

UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURÍMAC
FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



Tesis

Análisis hidrodinámico para determinar la vulnerabilidad de la infraestructura vial ante desbordes fluviales en el tramo km 339+200 al 343+200 del río Chalhuanca, Apurímac, 2025

Presentado por:

Jose Armando Condori Arone

Para optar el título de Ingeniero Civil

Abancay, Perú

2025



UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURÍMAC
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



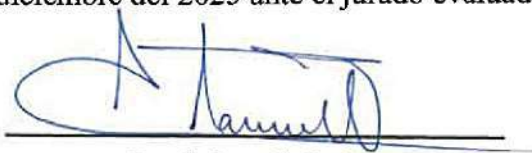
TESIS

Análisis hidrodinámico para determinar la vulnerabilidad de la infraestructura vial ante desbordes fluviales en el tramo km 339+200 al 343+200 del río Chalhuanca, Apurímac, 2025

Presentado por **Jose Armando Condori Arone**, para optar el título de Ingeniero Civil

Sustentado y aprobado el 23 de diciembre del 2025 ante el jurado evaluador:

Presidente:


Dr. Calixto Cañari Otero

Primer miembro:


Ing. Elbio Gomez Portilla

Segundo miembro:


Mag. Saul Jose Chipa Cahuana

Asesor:


Mtro. Diomedes N. Ferrel Sarmiento



"Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana"

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD N° 303-2025

La Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac, a través de la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería declara que, la Tesis intitulada: **"Análisis hidrodinámico para determinar la vulnerabilidad de la infraestructura vial ante desbordes fluviales en el tramo Km 339+200 al 343+200 del río Chalhuanca, Apurímac, 2025"**, presentada por el Bach. **JOSE ARMANDO CONDORI ARONE**", para optar el Título de **Ingeniero Civil**; ha sido sometido a un mecanismo de evaluación y verificación de similitud, a través del Software Turnitin, siendo el índice de similitud **ACEPTABLE de (10%)** por lo que, cumple con los criterios de originalidad establecidos por la Universidad.

Abancay, 12 de diciembre del 2025

Atentamente,


UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS
FACULTAD DE INGENIERÍA
Hesmeralda Rojas Enriquez
Dra. Hesmeralda Rojas Enriquez
DIRECTORA DE LA UNIDAD DE INVESTIGACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA

C. c.
Archivo
REG. N° 1014



Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a Dios, por guiarme día a día, cada paso del camino otorgándome su bendición y la fortaleza necesaria para avanzar con determinación y esperanza.

A mis amados padres, Alcides Condori Quispe y Tania Arone Ñahuinlla, quienes con su amor, esfuerzo y valores me han formado íntegramente como persona. Gracias a su ejemplo y apoyo incondicional, hoy logro cumplir una meta más en mi vida académica y profesional.

A mi asesor Ing. Diomedes N. Ferrel Sarmiento por apoyarme y lograr este anhelado objetivo.

Mi agradecimiento más profundo a mi familia y amigos, por su constante apoyo, comprensión y motivación. Sin su presencia y aliento, este logro no hubiera sido posible.

Jose Armando Condori Arone.



Dedicatoria

Quiero expresar mi gratitud a Dios por haberme permitido alcanzar este importante logro en mi carrera profesional y lograr este objetivo tan ansiado.

Dedico esta investigación a mis padres, cuyo amor, apoyo incondicional y motivación me han impulsado a alcanzar mis metas. Agradezco profundamente a mis padres por ser mi guía y fuente constante de fortaleza. También a mis amigos, por su paciencia, comprensión y por estar siempre a mi lado.

Este logro es para ustedes, que me han acompañado en cada paso de este camino y me han brindado el respaldo necesario para superar cada desafío. Sin su apoyo, este esfuerzo no habría sido posible.

Jose Armando Condori Arone.



Análisis hidrodinámico para determinar la vulnerabilidad de la infraestructura vial ante
desbordes fluviales en el tramo km 339+200 al 343+200 del río Chalhuanca,
Apurímac, 2025.

Línea de investigación: Ingeniería de la construcción

Esta publicación está bajo una Licencia Creative Commons



ÍNDICE

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
RESUMEN	3
ABSTRACT	4
CAPÍTULO I	5
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	5
1.1 Descripción del problema	5
1.2 Enunciado del problema	7
1.2.1 Problema general	7
1.2.2 Problemas específicos	7
1.3 Justificación de la investigación	7
CAPÍTULO II	9
OBJETIVOS E HIPÓTESIS	9
2.1 Objetivos de la investigación	9
2.1.1 Objetivo general	9
2.1.2 Objetivos específicos	9
2.2 Hipótesis de la investigación	9
2.2.1 Hipótesis general	9
2.2.2 Hipótesis específicas	10
2.3 Operacionalización de variables	11
CAPÍTULO III	12
MARCO TEÓRICO REFERENCIAL	12
3.1 Antecedentes	12
3.1.1 Internacionales	12
3.1.2 Nacionales	16
3.1.3 Locales	18
3.2 Marco teórico	19
3.2.1 Teorías del análisis hidrodinámico	19
3.2.1.1 Hidrodinámica de Saint-Venant	19
3.2.1.2 Ecuación empírica de Gauckler–Manning (Rugosidad del cauce)	21



3.2.1.3	Hidráulica de canales abiertos	23
3.2.2	Análisis hidrodinámico	23
3.2.3	Dimensiones del análisis hidrodinámico	24
3.2.3.1	Caudal	24
3.2.3.2	Profundidad	24
3.2.3.3	Velocidad	24
3.2.4	Selección de teorías y modelos relevantes variable dependiente	25
3.2.4.1	Modelo de vulnerabilidad estructural (UNDRO/FEMA)	25
3.2.4.2	Fragilidad estructural (HAZUS)	25
3.2.4.3	Análisis de vulnerabilidad y riesgo	25
3.2.5	Vulnerabilidad de la infraestructura vial	25
3.2.6	Dimensiones de la vulnerabilidad de la infraestructura vial	26
3.2.6.1	Daños estructurales	26
3.2.6.2	Amenaza fluvial	27
3.2.6.3	Índice de vulnerabilidad	27
3.2.7	Modelo seleccionado	28
3.2.8	Modelo conceptual	28
3.2.9	Definición y operacionalización de conceptos	28
3.2.9.1	Análisis hidrodinámico	28
3.2.9.2	Vulnerabilidad vial	28
3.2.10	Justificación de la selección teórica	28
3.3	Marco conceptual	29
CAPÍTULO IV		32
METODOLOGÍA		32
4.1	Tipo y nivel de investigación	32
4.2	Diseño de la investigación	33
4.3	Descripción ética de la investigación	34
4.4	Población y muestra	35
4.5	Procedimiento	38
4.6	Técnicas e instrumentos	40
4.7	Análisis estadístico	44
CAPÍTULO V		46
RESULTADOS Y DISCUSIONES		46
5.1	Análisis de los resultados	46
5.2	Contrastación de hipótesis	53
5.3	Discusión	57

CAPÍTULO VI	62
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	62
6.1 Conclusiones	62
6.2 Recomendaciones	64
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66
ANEXOS	72



ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 — Operacionalización de variables	11
Tabla 2 — Coeficiente de Manning	22
Tabla 3 — Tabla de elementos de la muestra	37
Tabla 4 — Instrumentos	41
Tabla 5 — Validación de instrumento	42
Tabla 6 — Expertos y el grado académico	42
Tabla 7 — Perfil hidráulico obtenido del modelado	46
Tabla 8 — Nivel de vulnerabilidad por puntos de exploración	47
Tabla 9 — Daños estructurales por puntos de exploración	49
Tabla 10 — Factores de amenaza por puntos de exploración	50
Tabla 11 — Nivel o índice de vulnerabilidad por puntos de exploración	52
Tabla 12 — Prueba de normalidad	53
Tabla 13 — Resumen del modelo	54
Tabla 14 — Ajuste de modelo O.G.	54
Tabla 15 — Resumen del modelo O.E. 1	55
Tabla 16 — Ajuste de modelo O.E. 1	55
Tabla 17 — Resumen del modelo O.E. 2	56
Tabla 18 — Ajuste de modelo O.E.2	56
Tabla 19 — Resumen del modelo O.E.3	57
Tabla 20 — Ajuste de modelo O.E.3	57
Tabla 21 — Matriz de consistencia.	73
Tabla 22 — Ruta de acceso al lugar de investigación	105
Tabla 23 — Coordenadas geográficas del muestreo del suelo	109
Tabla 24 — Análisis granulométrico	110
Tabla 25 — Límites de atterberg y contenido de humedad	111
Tabla 26 — Clasificación de suelos	112
Tabla 27 — Coeficientes de rugosidad de manning	113
Tabla 28 — Coeficientes de rugosidad de Manning - Iber	113
Tabla 29 — Clasificación de suelos y coeficientes de rugosidad	114

Tabla 30 — Datos de precipitación máxima en 24 horas según el SENAMHI	119
Tabla 31 — Distancia de estaciones al lugar del proyecto W1	120
Tabla 32 — Datos de precipitación máxima en 24 horas completadas	120
Tabla 33 — Valores de Ko para la prueba de datos atípicos	121
Tabla 34 — Datos atípicos de la estación de estudio	122
Tabla 35 — Periodos de retorno	123
Tabla 36 — Perfil hidráulico	132
Tabla 37 — Profundidad del río	134
Tabla 38 — Rangos de pendientes	136
Tabla 39 — Velocidad	138
Tabla 40 — Resumen de daños estructurales y efectos de los desbordes fluviales	143
Tabla 41 — Nivel de vulnerabilidad	151
Tabla 42 — Nivel de vulnerabilidad por puntos de exploración	152
Tabla 43 — Análisis de validación de instrumento	158

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 — Ecuación aproximación numérica para calcular el flujo Q_{i+1j} .	22
Figura 2 — Flujograma de procedimiento	39
Figura 3 — Determinación de contenido de humedad C-1	75
Figura 4 — Determinación de contenido de humedad C-2	76
Figura 5 — Determinación de contenido de humedad C-3	77
Figura 6 — Determinación de contenido de humedad C-4	78
Figura 7 — Determinación de contenido de humedad C-5	79
Figura 8 — Determinación de contenido de humedad C-6	80
Figura 9 — Determinación de contenido de humedad C-7	81
Figura 10 — Determinación de contenido de humedad C-8	82
Figura 11 — Determinación de contenido de humedad C-9	83
Figura 12 — Determinación de contenido de humedad C-10	84
Figura 13 — Determinación de límite líquido y límite plástico C-1	85
Figura 14 — Determinación de límite líquido y límite plástico C-2	86
Figura 15 — Determinación de límite líquido y límite plástico C-3	87
Figura 16 — Determinación de límite líquido y límite plástico C-4	88
Figura 17 — Determinación de límite líquido y límite plástico C-5	89
Figura 18 — Determinación de límite líquido y límite plástico C-6	90
Figura 19 — Determinación de límite líquido y límite plástico C-7	91
Figura 20 — Determinación de límite líquido y límite plástico C-8	92
Figura 21 — Determinación de límite líquido y límite plástico C-9	93
Figura 22 — Determinación de límite líquido y límite plástico C-10	94
Figura 23 — Curva granulométrica C-01	95
Figura 24 — Curva granulométrica C-02	96
Figura 25 — Curva granulométrica C-03	97
Figura 26 — Curva granulométrica C-04	98
Figura 27 — Curva granulométrica C-05	99
Figura 28 — Curva granulométrica C-06	100
Figura 29 — Curva granulométrica C-07	101

Figura 30 — Curva granulométrica C-08	102
Figura 31 — Curva granulométrica C-09	103
Figura 32 — Curva granulométrica C-10	104
Figura 33 — Ruta de acceso al lugar de investigación	106
Figura 34 — Longitud de estudio	107
Figura 35 — Longitud de estudio en el río Chalhuanca, 2025	108
Figura 36 — Coeficiente de rugosidad de Manning por material	116
Figura 37 — Precipitación normal acumulada	117
Figura 38 — Niveles de susceptibilidad por inundación	118
Figura 39 — Registro precipitaciones máximas en 24 horas	119
Figura 40 — Hidrograma de crecida	125
Figura 41 — Perfil hidrodinámico PH-1 en diferentes pasos temporales	126
Figura 42 — Perfil hidrodinámico PH-2 en diferentes pasos temporales	127
Figura 43 — Perfil hidrodinámico PH-3 en diferentes pasos temporales	128
Figura 44 — Perfil hidrodinámico PH-4 en diferentes pasos temporales	128
Figura 45 — Perfil hidrodinámico PH-5 en diferentes pasos temporales	129
Figura 46 — Perfil hidrodinámico PH-6 en diferentes pasos temporales	129
Figura 47 — Perfil hidrodinámico PH-7 en diferentes pasos temporales	130
Figura 48 — Perfil hidrodinámico PH-8 en diferentes pasos temporales	130
Figura 49 — Perfil hidrodinámico PH-9 en diferentes pasos temporales	131
Figura 50 — Perfil hidrodinámico PH-10 en diferentes pasos temporales	131
Figura 51 — Rangos de pendiente área de investigación – Chalhuanca	137
Figura 52 — Matriz de confusión con umbral ajustado / evaluar riesgo de desbordes	140
Figura 53 — Hidrograma y variables hidráulicas	141
Figura 54 — Número de Froude y zonas de riesgo	142
Figura 55 — Hidráulica paso 1200 – Calado(profundidad)	147
Figura 56 — Velocidad del flujo en dirección X (V_x) – paso 1200	148
Figura 57 — Velocidad del flujo en dirección X (V_x) – paso 5200	149
Figura 58 — Velocidad del flujo en dirección Y (V_y)	149
Figura 59 — Distribución del caudal específico en dirección X (q_x)	150
Figura 60 — Distribución del caudal específico en dirección Y (q_y)	150
Figura 61 — Perfil antes y después del modelado	151
Figura 62 — Ficha de levantamiento topográfico con DRONE.	153
Figura 63 — Ficha cuestionario en escala likert de cinco puntos.	154

Figura 64 — Valoración de instrumento experto N° 01	155
Figura 65 — Valoración de instrumento experto N° 02	156
Figura 66 — Valoración de instrumento experto N° 03	157
Figura 67 — Medición de ancho del río Chalhuanca	160
Figura 68 — Verificación de campo	160
Figura 69 — Exploración de campo Km 339+200	161
Figura 70 — Exploración de campo punto N° 01, en el Km 339+550	161
Figura 71 — Exploración de campo progresiva Km 342+000	162
Figura 72 — Socavación crecidas del río en la progresiva Km 342+200	162
Figura 73 — Exploración de campo en la progresiva Km 341+650	163
Figura 74 — Exploración de campo en la progresiva Km 339+900	163
Figura 75 — Exploración de campo progresiva Km 340+250	164
Figura 76 — Exploración de campo punto N° 06 en la progresiva Km 341+300	164
Figura 77 — Caudal de río Chalhuanca en el mes de febrero, 2025	165
Figura 78 — Exploración de campo punto N° 04 en la progresiva Km 340+600	165
Figura 79 — Crecida y socavación del río progresiva Km 338+850	166
Figura 80 — Disminución del caudal de río Chalhuanca mayo, 2025	166
Figura 81 — Verificación con dron de daños en la infraestructura vial	167
Figura 82 — Levantamiento de información con dron	167
Figura 83 — Crecida del río sector Chuquinga, data histórica	168
Figura 84 — Encuesta en el cuestionario en escala likert	168
Figura 85 — Desbordamiento del río	169
Figura 86 — Socavación y daños en la infraestructura vial	169
Figura 87 — Desbordamiento en la infraestructura vial en el Km 339+200	170
Figura 88 — Desbordamiento en la infraestructura vial en el Km 340+950	170
Figura 89 — Certificado de calibración “balanza” parte 1	171
Figura 90 — Certificado de calibración “balanza” parte 2	172
Figura 91 — Certificado de calibración “balanza” parte 2	173
Figura 92 — Certificado de calibración “balanza” parte 2	174
Figura 93 — Certificado de calibración “balanza” parte 2	175
Figura 94 — Certificado de calibración “balanza” parte 2	176
Figura 95 — Certificado de calibración “balanza” parte 3	177
Figura 96 — Certificado de calibración “tamices”	178
Figura 97 — Certificado de calibración “casagrande” parte 1	179

Figura 98 — Certificado de calibración “casagrande” parte 2	180
Figura 99 — Certificado de operatividad y funcionamiento del DRONE	181
Figura 100 — Acreditación transitoria de operador piloto de RPAS	182
Figura 101 — Declaratoria de originalidad del autor	183
Figura 102 — Autorización de consentimiento para realizar la investigación	184
Figura 103 — Plano de pendientes con rango de colores	185
Figura 104 — Variación de profundidad o calado	186
Figura 105 — Velocidad del flujo en dirección X (V_x) – paso 1200	187
Figura 106 — Velocidad del flujo en dirección Y (V_y)	188
Figura 107 — Distribución del caudal específico en dirección X (q_x)	189
Figura 108 — Distribución del caudal específico en dirección Y (q_y)	190

LISTADO DE ACRONIMOS

ANA	Autoridad Nacional del Agua
ANOVA	Análisis de Varianza
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
CFD	Dinámica de Fluidos Computacional
CENEPRED	Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres
EEA	European Environment Agency
EPS	Escala de Probabilidad de Sucesos
FEMA	Federal Emergency Management Agency
Fr	Número de Froude
GORE	Gobierno Regional
GIS	Sistema de Información Geográfica
IBER	Software IBER para modelación hidrodinámica 2D
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
IE	Energía Específica
INDECI	Instituto Nacional de Defensa Civil
INEI	Instituto Nacional de Estadística e Informática
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
LIDAR	Light Detection and Ranging
MDE	Modelo Digital de Elevación
MDT	Modelo Digital del Terreno
MTC	Ministerio de Transportes y Comunicaciones
n (Manning)	Coefficiente de rugosidad de Manning
ONU	Organización de las Naciones Unidas
OPS	Organización Panamericana de la Salud
PVD	Provías Descentralizado
PVN	Provías Nacional
Q (Caudal)	Caudal del flujo (m ³ /s)
QGIS	Quantum GIS
R ²	Coefficiente de determinación

RMSE	Error Cuadrático Medio
SENAMHI	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología
SIG	Sistema de Información Geográfica
SPSS	Statistical Package for the Social Sciences
SUCS	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos
SW	Prueba de Shapiro–Wilk
UNAMBA	Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac
UNESCO	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura
UNDRO	United Nations Disaster Relief Organization
V	
(Velocidad)	Velocidad del flujo (m/s)

INTRODUCCIÓN

Esta investigación se centró en un problema de gran relevancia para la ingeniería civil y la gestión del riesgo en infraestructura vial: La vulnerabilidad estructural generada por los desbordes del río Chalhuanca en el tramo comprendido entre los kilómetros 339+200 y 343+200 de la carretera PE+30A, ubicada en la región de Apurímac.

En los últimos años, se han registrado aumentos significativos del caudal, alcanzando valores superiores a 250,9 m³/s en periodos de crecida, lo que resulto la erosión lateral, pérdida de material de relleno y deterioro progresivo de los taludes contiguos a la vía. Esta acción ha disminuido el rendimiento estructural de las carreteras y la seguridad en los viajes locales, especialmente durante la temporada de lluvias. Debido a este problema, se requirió estudiar el comportamiento hidrodinámico del río y sus relaciones con la infraestructura vial dentro del marco de enfoques científicos, que pudieran cuantificar la vulnerabilidad existente y estimar escenarios de riesgo. La ausencia de los estudios técnicos con base en modelación hidráulica en este sector limita las medidas de protección y encauzamiento, lo que justifica fuertemente la ejecución de este estudio.

En conjunto, el objetivo de la investigación fue examinar el papel que tienen los estudios hidrodinámicos en la influencia de la vulnerabilidad de la infraestructura vial ante los desbordamientos de ríos encontrados en la región entre el Km 339+200 y el Km 343+200 a lo largo del río Chalhuanca Apurímac, 2025. Se aplicó principios teóricos de hidráulica e hidrodinámica fluvial, apoyando el comportamiento del flujo en canales abiertos mediante las ecuaciones de Saint-Venant, la ecuación de Manning y el número de Froude, permitiendo la identificación de áreas significativas de erosión y acumulación de energía. La metodología adaptada fue cuantitativa, de tipo aplicada, de nivel correlacional y no experimental transversal. Se utilizaron datos de campo levantados, datos hidrológicos y geotécnicos y registros institucionales de SENAMHI (2023), para preparar datos topográficos, hidrológicos y geotécnicos.

La simulación de flujo se diseñó en el software Iber 3.2 y se generó un modelo digital del terreno (MDT) en QGIS 3.22, basado en celdas de 2 m para precisión numérica. Estos resultados fueron validados estadísticamente utilizando modelos de regresión lineal simple, procesados en SPSS,



para investigar la influencia del análisis hidrodinámico en la vulnerabilidad estructural, el potencial de daño estructural, la amenaza del río y las mediciones del índice de vulnerabilidad.

La investigación está organizada en 6 capítulos que abordan de manera integral los elementos principales del estudio. El **Capítulo I**, describe y sitúa el problema, incluyendo los elementos particulares del campo de estudio, su relación, antecedentes y el proceso de justificación del estudio. **Capítulo II**, establece los objetivos generales y particulares; luego se pueden determinar las hipótesis y variables de investigación que informan el desarrollo del estudio. **Capítulo III**, se presenta todo el marco teórico referencial, donde se discuten los antecedentes importantes y los conceptos necesarios que sustentan el análisis. **Capítulo IV**, describe la metodología aplicada, los instrumentos, como también las técnicas de recolección y los procedimientos de simulación y análisis estadístico. **Capítulo V**, se presenta los resultados, la aplicación del modelo hidrodinámico, la discusión y la propuesta de medidas de mitigación. **Capítulo VI**, incluye las conclusiones derivadas del estudio y las recomendaciones técnicas para la gestión de la infraestructura vial.

Los datos científicos y técnicos proporcionados por este estudio son importantes para predecir y prevenir los impactos que los desbordamientos de ríos tendrían en la infraestructura vial con el fin de proporcionar herramientas de análisis que puedan ser utilizadas en otras áreas similares.



RESUMEN

El tramo vial comprendido entre los kilómetros 339+200 y 343+200 del río Chalhuanca presenta una mayor vulnerabilidad frente a desbordes fluviales, registrándose en enero de 2024 caudales máximos de 250.9 m³/s donde ocasionaron la destrucción aproximada de 300 metros de carretera y afectaron a más de 2 500 pobladores. La magnitud de estos daños evidencia la necesidad de estudiar como el análisis hidrodinámico permite determinar la vulnerabilidad de la infraestructura vial ante eventos extremos. El objetivo del estudio de investigación fue determinar de qué manera el análisis hidrodinámico influye en la vulnerabilidad de la infraestructura vial ante desbordes fluviales en el tramo mencionado. El estudio acogió un enfoque cuantitativo de tipo aplicada con un nivel correlacional y un diseño no experimental, transversal. La población estuvo conformada por el tramo vial y la muestra se constituyó por diez puntos críticos identificados en campo. Se usaron las ecuaciones de Saint-Venant, la fórmula de Manning y el número de Froude para sustentar la modelación hidrodinámica realizada en Iber 3.2, complementada con información topográfica procesada en QGIS 3.22. Los análisis estadísticos usados mediante la regresión lineal simple mostraron relaciones significativas entre el análisis hidrodinámico y la vulnerabilidad estructural ($R^2 = 0.423$; $p = 0.042$), los daños potenciales ($R^2 = 0.762$; $p = 0.001$), el índice de vulnerabilidad ($R^2 = 0.773$; $p = 0.001$) y la amenaza fluvial ($R^2 = 0.423$; $p = 0.042$). Se concluye que el análisis hidrodinámico permitió determinar de manera significativa la vulnerabilidad de la infraestructura vial ante desbordes fluviales.

Palabras clave: Vulnerabilidad vial, análisis hidrodinámico.



ABSTRACT

The road section between kilometers 339+200 and 343+200 of the Chalhuanca River presents greater vulnerability to river overflows, with maximum flows of 250.9 m³/s recorded in January 2024, which caused the destruction of approximately 300 meters of roadway and affected more than 2,500 residents. The magnitude of these damages highlights the need to study how hydrodynamic analysis makes it possible to determine the vulnerability of road infrastructure during extreme events. The objective of this research study was to analyze how hydrodynamic assessment allows determining the vulnerability of road infrastructure in the aforementioned section. The study employed a quantitative, applied approach, with an explanatory level and a non-experimental, cross-sectional design. The population consisted of the road section, and the sample was made up of ten critical points identified in the field. The Saint-Venant equations, Manning's formula, and the Froude number were used to support the hydrodynamic modeling carried out in Iber 3.2, complemented with topographic information processed in QGIS 3.22. The statistical analyses performed using simple linear regression showed significant relationships between hydrodynamic analysis and structural vulnerability ($R^2 = 0.423$; $p = 0.042$), potential damages ($R^2 = 0.762$; $p = 0.001$), the vulnerability index ($R^2 = 0.773$; $p = 0.001$), and fluvial hazard ($R^2 = 0.423$; $p = 0.042$). It is concluded that hydrodynamic analysis significantly contributed to determining the vulnerability of road infrastructure to river overflows.

Keywords: *road vulnerability, hydrodynamic analysis.*



CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción del problema

En las últimas décadas, los eventos hidrometeorológicos de alta intensidad han aumentado en todo el mundo, causando daños importantes en las carreteras. Según informes del Banco Mundial (2022) y de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe CEPAL (2022), los desbordes de ríos constituyen una de las principales causas de daño en carreteras, puentes y redes de drenaje en América Latina, ocasionando y dando como resultado pérdidas superiores a 2,500 millones al año y afectando la conectividad regional de más de 20 millones de personas.

En el contexto nacional, el Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú MTC (2023) ha identificado más de 380 puntos críticos impacto vial por desbordes fluviales en la red vial nacional. Una de las regiones más vulnerables destaca Apurímac, donde los ríos Chalhuanca, Pachachaca y Antabamba presentan comportamientos hidrológicos irregulares, especialmente durante los meses de enero a marzo. Según registros del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología SENAMHI (2023), el río Chalhuanca ha alcanzado caudales máximos de 250,9 m³/s, superando su capacidad hidráulica promedio en un 64%.

La provincia de Aymaraes, está ubicada en la región Apurímac, se caracteriza por su compleja geografía andina así mismo por disponer de una red vial nacional estratégica para la conectividad hacia la capital. Por lo tanto, el río Chalhuanca constituye un eje hidrográfico fundamental, ya que discurre en paralelo a la carretera Interoceánica Sur (vía nacional PE-30A), infraestructura que enlaza centros urbanos, productivos y de servicios. Sin embargo, esta cercanía al cauce convierte a varios tramos viales en zonas vulnerables a crecidas y desbordes durante la temporada de lluvias.

En los últimos años, la creciente de eventos hidrometeorológicos extremos, asociada a la variabilidad y al cambio climático, ha incrementado la constancia e intensidad de las precipitaciones en la zona. Estos eventos provocan aumentos inesperados del caudal del



río Chalhuanca, ocasionando desbordes e inundaciones que impactan gravemente en la infraestructura vial, los sistemas de riego, las áreas agrícolas, las viviendas y los servicios básicos. El tramo comprendido entre el Km 339+200 y el Km 343+200 de la PE-30A ha sido identificado como uno de los sectores más vulnerables debido a su proximidad al cauce, la morfología estrecha del valle y la limitada capacidad hidráulica de las obras de drenaje y protección existentes.

Durante los eventos pluviales en el 2024, se registraron múltiples eventos que evidenciaron esta vulnerabilidad. El primer reporte de huaico ocurrió el 2 de enero, seguido de nuevos desbordes los días 21 y 25 del mismo mes. Los impactos fueron severos como: desbordamientos, erosión de taludes, pérdida de material de plataforma, colapso parcial de la carpeta asfáltica y la presencia de desbordes fluviales en algunos sectores del tramo Km 339+200 y el Km 343+200 de la PE-30A. Según el Centro de Operaciones de Emergencia Nacional “COEN”, Instituto Nacional de Defensa Civil “INDECI”, el último evento reportado el 29 de enero de 2024 hizo la destrucción de aproximadamente 300 metros de vía, dejando a la capital provincial, Chalhuanca, incomunicada con el resto del país.

Estos daños no se limitaron al sistema vial. Los desbordes afectaron también infraestructuras de: riego, cultivos agrícolas, viviendas, redes de agua potable y energía eléctrica, lo que obligó a la evacuación instantánea de familias hacia albergues temporales. Estos daños repercuten de forma directa en la economía local, la seguridad de la población y la continuidad de los servicios básicos.

La constancia de estos fenómenos, sumada a la variabilidad climática y al cambio climático, traza un escenario de riesgo creciente. Factores como la expansión urbana desordenada, el cambio de uso de suelo y la insuficiencia e inexistencia de las obras de protección incrementan la vulnerabilidad del tramo vial ante futuros eventos extremos. Ante este escenario, resulto imprescindible realizar un análisis hidrodinámico detallado del tramo Km 339+200 – Km 343+200 del río Chalhuanca, que permitió determinar la vulnerabilidad de la infraestructura vial frente a los desbordes fluviales. Los resultados de esta investigación compondrán un insumo técnico y muy clave para la planificación y ejecución de medidas preventivas y de mitigación, contribuyendo así a la reducción de pérdidas económicas, la mejora de la resiliencia vial y la seguridad de los usuarios.



1.2 Enunciado del problema

1.2.1 Problema general

¿De qué manera el análisis hidrodinámico influye en la vulnerabilidad de la infraestructura vial ante desbordes fluviales en el tramo Km 339+200 al 343+200 del río Chalhuanca, Apurímac, 2025?

1.2.2 Problemas específicos

- ¿De qué manera el análisis hidrodinámico influye en los daños estructurales potenciales de la infraestructura vial ante desbordes fluviales en el tramo Km 339+200 al Km 343+200 del río Chalhuanca, Apurímac, 2025?
- ¿De qué manera el análisis hidrodinámico influye en los factores de amenaza fluvial de la infraestructura vial ante desbordes fluviales en el tramo Km 339+200 al Km 343+200 del río Chalhuanca, Apurímac, 2025?
- ¿De qué manera el análisis hidrodinámico influye en el índice de vulnerabilidad de la infraestructura vial ante desbordes fluviales en el tramo Km 339+200 al Km 343+200 del río Chalhuanca, Apurímac, 2025?

1.3 Justificación de la investigación

La vulnerabilidad de la infraestructura vial desde el Km 339+200 hasta el 343+200 del río Chalhuanca en la región de Apurímac alcanzo niveles críticos debido a los desbordes del río que ocurrieron en enero de 2024. Los desbordes del río Chalhuanca resultaron en la destrucción de al menos 300 metros de la plataforma asfáltica de la Carretera Interoceánica Sur (PE-30A), dejando a la capital provincial de Aymaraes aislada y afectando directamente a más de 2,500 personas, según informes del Centro de Operaciones de Emergencia Nacional "COEN" y el Instituto Nacional de Defensa Civil "INDECI"; esta situación ha causado graves pérdidas económicas, sociales y ambientales, incluyendo interrupciones en el transporte, deterioro de la infraestructura de riego y daños a la producción agrícola.

Además, es probable que estos eventos de desbordamiento de ríos sean más frecuentes con una mayor incidencia de eventos climáticos extremos como resultado del cambio climático. Esto enfatiza la necesidad de investigar para encontrar la raíz de la



vulnerabilidad y también medidas científicas y prácticas para abordar los riesgos. El estudio hidrodinámico es importante para prever el futuro y decidir planificar ciertos escenarios, y la infraestructura de carreteras se considera crítica para la seguridad y funcionalidad de la infraestructura vial en esta región crítica para el desarrollo de Apurímac. El problema es un peligro continuo para la seguridad en las carreteras, la conectividad regional y nacional. Como se observa en los registros hidrológicos y los daños observados, la magnitud del riesgo requiere un diagnóstico técnico oportuno y una respuesta y acción preventiva, especialmente en el contexto de una ocurrencia cada vez más extensa de eventos extremos debido al cambio climático.

Esta investigación añade nuevos conocimientos dirigidos a la planificación de infraestructuras resilientes e implementa herramientas de simulación hidrodinámica que ayudan a anticipar escenarios de riesgo para una inversión pública óptima en mantenimiento y obras de protección.

El estudio es sin precedentes para la sección estudiada del río Chalhuanca, marcado como la primera aplicación documentada del software Iber 3.2 para modelar flujos bidimensionales en la región de Apurímac. La singularidad radica en que estas herramientas combinan herramientas científicas de alto nivel, incluyendo, pero no limitándose a modelos hidrodinámicos, para evaluar de manera sistemática y exhaustiva la vulnerabilidad de la infraestructura vial en un contexto específico. Esto no solo aporta nueva información al campo de la ingeniería civil, sino que también proporciona un plan replicable para problemas similares en diferentes regiones.

A través de la combinación de modelado hidrodinámico, análisis estadístico y criterios de ingeniería vial, esta investigación contribuye a proporcionar una metodología que será un modelo útil para evaluar la vulnerabilidad en sistemas de cuencas fluviales. Los hallazgos pueden ser una base científica y técnica para todas las instituciones públicas y privadas dedicadas a la gestión de riesgos y al diseño de infraestructura vial segura.

CAPÍTULO II

OBJETIVOS E HIPÓTESIS

2.1 Objetivos de la investigación

2.1.1 Objetivo general

Determinar de qué manera el análisis hidrodinámico influye en la vulnerabilidad de la infraestructura vial ante desbordes fluviales en el tramo Km 339+200 al Km 343+200 del río Chalhuanca, Apurímac, 2025.

2.1.2 Objetivos específicos

- Determinar de qué manera el análisis hidrodinámico influye en los daños estructurales potenciales de la infraestructura vial ante desbordes fluviales en el tramo Km 339+200 al Km 343+200 del río Chalhuanca, Apurímac, 2025.
- Determinar de qué manera el análisis hidrodinámico influye en los factores de amenaza fluvial de la infraestructura vial ante desbordes fluviales en el tramo Km 339+200 al Km 343+200 del río Chalhuanca, Apurímac, 2025.
- Determinar de qué manera el análisis hidrodinámico influye en el índice de vulnerabilidad de la infraestructura vial ante desbordes fluviales en el tramo Km 339+200 al Km 343+200 del río Chalhuanca, Apurímac, 2025.

2.2 Hipótesis de la investigación

2.2.1 Hipótesis general

El análisis hidrodinámico influye de manera significativa en la vulnerabilidad de la infraestructura vial ante desbordes fluviales en el tramo Km 339+200 al Km 343+200 del río Chalhuanca, Apurímac, 2025.



2.2.2 Hipótesis específicas

- El análisis hidrodinámico influye de manera significativa en los daños estructurales potenciales de la infraestructura vial ante desbordes fluviales en el tramo Km 339+200 al Km 343+200 del río Chalhuanca, Apurímac, 2025.
- El análisis hidrodinámico influye de manera significativa en los factores de amenaza fluvial de la infraestructura vial ante desbordes fluviales en el tramo Km 339+200 al Km 343+200 del río Chalhuanca, Apurímac, 2025.
- El análisis hidrodinámico influye de manera significativa en el índice de vulnerabilidad de la infraestructura vial ante desbordes fluviales en el tramo Km 339+200 al Km 343+200 del río Chalhuanca, Apurímac, 2025.



2.3 Operacionalización de variables

Tabla 1 — Operacionalización de variables

Variables	Definición conceptual	Definición operacional:	Dimensión	Indicadores	Ítem/ unidad	Instrumento
Independiente X: Análisis hidrodinámico	Estudio del comportamiento del flujo de agua en canales abiertos, expresado en función del caudal, la velocidad, la profundidad y la pendiente del cauce. CHOW, (1959) ; SAINT- VENANT, (1871)	Evaluación numérica y gráfica del flujo del río Chalhuanca mediante modelación 2D (software Iber), considerando condiciones topográficas y rugosidad del cauce.	Caudal	- Caudal modelado - Caudal máximo en crecida	m³/s (metros cúbicos/seg)	- Ficha Excel para levantamiento topográfico - Ficha de Ensayos de Suelo - Ficha de Simulación Hidrodinámica - Ficha de Datos Hidrológicos
			Profundidad	- Puntos críticos de anegación - Afectaciones a la vía. - Profundidad máxima del flujo. .	m: metros	
			Velocidad	- Flujo de direcciones - Velocidad del flujo	metros por segundo (m/s)	
Dependiente Y: Vulnerabilidad de la infraestructura vial	Grado de susceptibilidad de la vía a sufrir daños o fallas estructurales ante el impacto de flujos fluviales intensos. UNDRO, (1982); MTC, (2020).	Evaluación física y estadística del nivel de afectación de la vía frente a los parámetros hidrodinámicos, correlacionando valores de erosión, estabilidad y daños estructurales.	Daños estructurales	- Desbordes fluviales. - Daños laterales. - Erosión del talud.	Registro fotográfico /m afectados	- Ficha de campo o de registro de características visuales - Registro fotográfico
			Amenaza fluvial	- Régimen hidráulico - Pendiente hidráulica	- Número de Froude. - Zonas con flujo supercrítico ($Fr > 1$). - m/m	
			Índice de vulnerabilidad vial	- Nivel de vulnerabilidad por punto crítico - Clasificación de niveles: Muy baja, Baja, Media, Alta, Muy alta.	Escala cualitativa ordinal	

CAPÍTULO III

MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

3.1 Antecedentes

3.1.1 Internacionales

- a) Van Ginkel et al. (2021), desarrollaron un estudio; el objetivo fue de evaluar la vulnerabilidad de la infraestructura vial europea frente a inundaciones fluviales. La población del estudio se constituyó por la red vial del continente europeo, compuesta por aproximadamente 200 000 km de carreteras expuestas a procesos potenciales de inundación; de esta población, cada segmento de vía se consideró como una unidad individual de análisis, conformando así la muestra evaluada. Para alcanzar el objetivo, los autores emplearon una metodología basada en la modelación hidrodinámica y en el análisis espacial, integrando simulaciones de niveles y profundidades de inundación con herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG); la intermediación metodológica incluyó la implementación de un método de exposición basado en objetos, que permitió evaluar cada segmento de carretera de forma independiente, y la aplicación de funciones de daño específicas por tipo de infraestructura, construidas según parámetros estructurales y geométricos propios de cada vía. La investigación se sustentó teóricamente en los principios del análisis hidrodinámico de inundaciones, fundamentado en las ecuaciones de Saint-Venant y Navier–Stokes Chow (1988), en el uso de funciones de daño asociadas a la profundidad del flujo, tal como señalan Merz et al. (2010), y en la teoría de la vulnerabilidad física de infraestructuras, definida por Wisner et al. (2004), como el grado de susceptibilidad al daño en presencia de fenómenos peligrosos. Asimismo, se apoyaron en los fundamentos del análisis espacial en SIG, descritos por Longley et al. (2015), que permiten la superposición de capas hidrológicas con infraestructura para determinar la exposición. Los resultados obtenidos mostraron que el daño anual esperado para la red vial europea alcanzó un valor aproximado de 230 millones de euros, cifra que evidenció la significativa afectación económica asociada a eventos de inundación fluvial. Además, identificaron que la profundidad y la velocidad del flujo fueron los parámetros



hidrodinámicos que más influyeron en la magnitud del daño, es así que determinaron los segmentos con mayor nivel de vulnerabilidad. Los autores concluyeron que la integración entre modelación hidrodinámica, funciones de daño y análisis espacial permitió priorizar de manera precisa los tramos viales más expuestos, contribuyendo a mejorar la planificación de medidas de mitigación y la protección de la infraestructura vial europea.

- b) Arrighi et al., (2020), realizaron un estudio con el objetivo de evaluar la vulnerabilidad de las infraestructuras lineales ante inundaciones fluviales en Italia, para determinar los efectos directos e indirectos sobre la conectividad vial. La población analizada estuvo constituida por una red vial urbana de 250 km, y la muestra estuvo compuesta por 42 segmentos críticos identificados como expuestos a eventos de inundación. La metodología usada se basó en la modelación hidrodinámica bidimensional (2D) mediante el uso del software TELEMAC, junto con un análisis de riesgo sistémico orientado a cuantificar la pérdida de accesibilidad generada por diferentes escenarios de inundación. En esta aproximación integraron el concepto de propagación de la onda de inundación para simular la dinámica del flujo sobre la red vial, así como la noción de vulnerabilidad funcional, entendida como la pérdida de desempeño de la infraestructura ante la exposición al peligro.

El estudio se sustentó teóricamente con los principios del régimen hidráulico, la dinámica de inundaciones y la teoría de la vulnerabilidad física y funcional de infraestructuras, tal como lo desarrollaron en la literatura científica (Merz et al., 2010; Wisner et al., 2004), estos fundamentos permitieron interpretar la relación entre la magnitud de la inundación, el comportamiento del flujo y la disminución de la capacidad operativa de la red vial. Los resultados indicaron que la pérdida de accesibilidad podía aumentar hasta cuatro veces bajo un evento con periodo de retorno de 100 años, lo que evidenció la fuerte dependencia entre la funcionalidad vial y las condiciones hidrodinámicas extremas. Asimismo, se observaron que los segmentos ubicados cerca de los canales secundarios fueron los más afectados debido a las fluctuaciones en la profundidad del agua. Los autores concluyeron que el grado de vulnerabilidad vial estuvo determinado principalmente por el régimen hidráulico local y la topografía, factores que

permitieron identificar los tramos más sensibles y priorizar acciones de mitigación.

- c) Pregnotato et al., (2021), desarrollaron un estudio cuyo objetivo fue evaluar la vulnerabilidad de las carreteras urbanas frente a inundaciones mediante la aplicación de modelación hidrodinámica bidimensional. La población estuvo constituida por una red urbana de 300 km de carreteras, mientras que la muestra incluyó 87 intersecciones identificadas como puntos críticos expuestos a flujos superficiales. La metodología empleada se basó en la modelación hidrodinámica 2D, fundamentada en las ecuaciones de Saint-Venant, con el propósito de simular la profundidad y la velocidad del flujo durante eventos de inundación. Los autores complementaron estas simulaciones con un índice de vulnerabilidad, elaborado para cuantificar la pérdida de funcionalidad vial ante diferentes condiciones hidráulicas.

El estudio se sustentó teóricamente en los conceptos de energía específica, velocidad crítica y fricción hidráulica, los cuales permitieron interpretar el comportamiento del flujo en superficie y su interacción con la infraestructura vial Chow (1988); Merz et al., 2010), estas bases facilitaron la comprensión de los mecanismos que incrementan o disminuyen la capacidad operativa de las carreteras durante episodios de inundación. Los resultados mostraron que profundidades superiores a 0.30 m y velocidades mayores a 1 m/s reducían la funcionalidad de las carreteras en aproximadamente 53%, evidenciando una significativa afectación operativa bajo condiciones hidrodinámicas intensas. Los autores concluyeron que el comportamiento hidrodinámico del flujo constituye el factor determinante para estimar la vulnerabilidad vial urbana y, por lo tanto, debieron integrarse de manera prioritaria en la planificación del riesgo y en el diseño de medidas de mitigación.

- d) Gaume et al. (2020), llevaron a cabo un estudio con el objetivo de evaluar los procesos de inundaciones repentinas mediante análisis hidrodinámicos, con la finalidad de identificar los daños generados en caminos rurales. La población del estudio estuvo conformada por 10 cuencas sujetas a eventos de inundación súbita, mientras que la muestra incluyó 55 tramos de carretera que habían sido afectados directamente por estos eventos extremos. La metodología aplicada se

basó en la modelación hidrodinámica bidimensional (2D), utilizando mallas irregulares de alta resolución para representar la variabilidad geomorfológica de las cuencas. Asimismo, los autores realizaron reconstrucciones de eventos extremos, a partir de registros hidrológicos y evidencia de campo, con el fin de simular la interacción del flujo rápido con los tramos viales rurales.

El estudio se fundamentó teóricamente en conceptos avanzados de dinámica de inundaciones repentinas, específicamente en el régimen supercrítico, el número de Froude y el esfuerzo cortante del flujo, los cuales permiten comprender los mecanismos de erosión, transporte y socavación en carreteras expuestas (Chow, 1988; Merz et al., 2010), estos parámetros proporcionaron el marco analítico para interpretar la respuesta estructural de la infraestructura rural ante flujos altamente energéticos. Los resultados evidenciaron que velocidades del flujo entre 2 y 2.5 m/s coincidieron con socavaciones profundas y fallas estructurales en más del 60 % de los tramos analizados, lo que demostró la elevada capacidad destructiva de los flujos supercríticos en contextos topográficos confinados. Los autores concluyeron que la socavación lateral fue el principal mecanismo de vulnerabilidad de las carreteras rurales, especialmente en zonas donde los canales estrechos intensifican la energía del flujo, incrementando el riesgo de pérdida estructural.

- e) Xia et al. (2022), llevaron a cabo un estudio cuyo objetivo fue analizar el impacto de la velocidad del flujo y del esfuerzo cortante sobre las infraestructuras viales ubicadas en las inmediaciones de cursos de agua, con el fin de determinar su nivel de vulnerabilidad hidráulica. La población del estudio correspondió a una cuenca asiática expuesta a procesos de inundación, mientras que la muestra estuvo conformada por 21 tramos de carretera localizados en zonas críticas próximas al cauce. La metodología aplicada consistió en el uso de un modelado hidrodinámico acoplado 1D-2D, implementado mediante HEC-RAS 2D, complementado con experimentos de calibración basados en datos observados de velocidad y profundidad del flujo. Esta aproximación permitió representar tanto el comportamiento longitudinal del flujo en el cauce como su propagación transversal hacia la infraestructura vial.

El estudio se sustentó teóricamente en conceptos de hidrodinámica fluvial, particularmente en el análisis del esfuerzo cortante, la velocidad del flujo y sus efectos sobre la estabilidad de taludes y plataformas viales (Chow, 1988; Merz et al., 2010), estos fundamentos permitieron explicar los mecanismos físicos responsables del deterioro estructural y de la socavación lateral en carreteras expuestas. Los resultados indicaron que esfuerzos cortantes superiores a 40 N/m^2 incrementaron en 2.8 veces la probabilidad de fallo lateral en los tramos viales evaluados, demostrando la alta sensibilidad de la infraestructura al comportamiento energético del flujo. Los autores concluyeron que los índices de vulnerabilidad utilizados en la evaluación del riesgo deben incorporar explícitamente los parámetros hidrodinámicos, dado que estos determinan en gran medida la estabilidad y el desempeño de las carreteras adyacentes a cursos de agua.

3.1.2 Nacionales

- a) Quiliche (2023), desarrollaron un estudio con el objetivo de evaluar la vulnerabilidad de carreteras altoandinas frente a procesos de socavación fluvial en la región Cajamarca. La población estuvo conformada por nueve tramos de carretera expuestos a afectación fluvial, de los cuales se seleccionaron como muestra los sectores que presentaron evidencia directa de erosión, totalizando un conjunto evaluado de áreas críticas previamente georreferenciadas. La metodología empleada consistió en la modelación hidrodinámica bidimensional mediante el software Iber 2D, utilizando mallas finas de alta resolución que permitieron capturar parámetros hidráulicos como profundidad, velocidad y esfuerzo cortante. La base teórica se sustentó en los conceptos de energía específica, pendiente crítica y criterios de erosión, además del régimen de flujo descrito por las ecuaciones de Saint-Venant. Los resultados evidenciaron procesos de erosión lateral entre 1.5 y 2.0 m/año, particularmente en zonas donde el número de Froude superó 1.0 y la corriente adquirió características de flujo supercrítico. Asimismo, los mapas morfodinámicos mostraron un avance progresivo del eje hidráulico hacia los bordes de la plataforma vial. Concluyó que la vulnerabilidad de las carreteras altoandinas estuvo determinada principalmente por el régimen hidráulico del río y la proximidad del eje de flujo al área intervenida, recomendando incorporar obras de protección para evitar la pérdida de la plataforma vial.



- b) Ramos Paucar (2024), realizaron un estudio orientado a determinar la vulnerabilidad de la carretera ubicada en la Av. Carrión, Huancayo, frente a peligros hidrológicos asociados a desbordes y saturación del drenaje urbano. La población estuvo constituida por un tramo vial de 2.5 km, del cual se seleccionaron como muestra 25 secciones críticas, determinadas a partir de inspecciones técnicas y registros de fallas previas. La metodología incluyó un análisis hidrológico detallado, la evaluación de la capacidad hidráulica de las estructuras de drenaje y el levantamiento estructural de la plataforma vial. El estudio se fundamentó en los conceptos de fragilidad estructural, intensidad de precipitaciones y capacidad de evacuación del sistema hidráulico urbano. Los resultados mostraron que el 72 % de las secciones evaluadas presentaron un nivel de vulnerabilidad alto debido a insuficiencia en el drenaje, saturación del suelo y proximidad a cursos de agua. Asimismo, se registró que eventos de lluvia de moderada intensidad superaron la capacidad máxima de evacuación hidráulica, provocando inundaciones recurrentes; concluyeron que la vulnerabilidad estuvo fuertemente influenciada por la combinación de precipitaciones intensas, limitaciones en el drenaje e interacción directa con el río Shullcas, recomendando incrementar la capacidad de descarga del sistema y reforzar la plataforma vial.
- .
- c) Huaman Ucharima (2022), desarrollaron un estudio con el objetivo de modelar los efectos de desbordes fluviales sobre caminos rurales en Ayacucho. La población consistió en 12 km de carretera, de los cuales se seleccionaron 6 sectores vulnerables como muestra representativa. La metodología se basó en la modelación unidimensional con HEC-RAS 1D, empleando perfiles transversales y condiciones de flujo gradualmente variado. La base teórica se sustentó en los principios de energía específica, pendiente hidráulica y continuidad del flujo, permitiendo analizar la posible interacción del caudal con la vía. Los resultados indicaron que las zonas críticas alcanzaron profundidades superiores a 0.60 m, lo que generó interrupciones temporales del tránsito y deterioro de estructuras superficiales. Asimismo, los sectores con mayor sinuosidad del río y suelos sueltos mostraron vulnerabilidad elevada. Huamán concluyó que la vulnerabilidad vial aumentó con la presencia de canales sinuosos, suelos de baja cohesión y niveles de agua que excedieron la capacidad

de soporte de los taludes, recomendando intervenciones de encauzamiento para reducir el riesgo.

- d) Torres Suyo (2021), estudiaron la vulnerabilidad de carreteras en el Valle del Mantaro mediante modelación hidrodinámica. La población estuvo conformada por 15 km de canal natural, y la muestra incluyó 10 secciones viales expuestas a socavación. El autor implementó HEC-RAS 2D, utilizando mallas regulares para simular velocidades, esfuerzos cortantes y dirección del flujo. La base teórica se apoyó en los conceptos de velocidad crítica, régimen de flujo y estabilidad de taludes. Los resultados identificaron erosiones significativas en zonas donde la velocidad superó 1.8 m/s, generando pérdida de material en la margen derecha y desplazamientos laterales del cauce. Torres Suyo concluyó que la vulnerabilidad dependió tanto del tipo de suelo como de la alineación del canal, recomendando obras de protección longitudinal.
- e) Cuba (2021), evaluaron la vulnerabilidad de carreteras en Cusco frente a inundaciones fluviales integrando modelación hidrodinámica y análisis GIS. La población abarcó 80 km de carretera, de los cuales se seleccionaron 24 secciones para su análisis. La metodología combinó simulaciones hidrodinámicas y análisis espacial, basándose en conceptos de tensión cortante y energía específica. El estudio determinó que un incremento del 30 % del caudal elevó significativamente la vulnerabilidad física de los tramos estudiados, especialmente en sectores con menor sección hidráulica disponible. Concluyó que los efectos de la dinámica fluvial intensifican la exposición de la infraestructura vial y requieren medidas inmediatas de mitigación.

3.1.3 Locales

- a) CENEPRED (2023), realizaron un estudio de peligros hidrológicos en el distrito de Chalhuanca, con el objetivo de evaluar la exposición de la infraestructura vial ante incrementos de caudal. La población comprendió a todo el distrito, mientras que la muestra estuvo conformada por 35 elementos expuestos, incluyendo carreteras, viviendas y áreas agrícolas. La metodología empleada se basó en análisis GIS, elaboración de mapas de tasas de flujo, gradientes hidráulicos y pendientes topográficas. El estudio se sustentó en el Manual de Métodos de Estimación de Riesgos y en el concepto de vulnerabilidad física. Los resultados



revelaron que las áreas adyacentes al río Chalhuanca presentaron niveles de vulnerabilidad entre media y alta, debido a incrementos en la tasa de flujo máxima y a la proximidad directa del cauce a la infraestructura. CENEPRED concluyó que la probabilidad de afectación vial aumentó proporcionalmente al incremento del caudal pico, recomendando priorizar medidas de contención y control hidráulico.

- b) INDECI (2024), reportó daños severos ocasionados por eventos de lluvia intensa en la carretera P-30A, en el tramo Chalhuanca. La población estuvo representada por la totalidad de la vía afectada y se evaluaron como muestra las secciones donde se registraron colapso y erosión lateral. La metodología consistió en inspecciones de campo, registros fotográficos, análisis hidrológico básico y análisis preliminar de estabilidad. Teóricamente, el informe se fundamentó en los conceptos de socavación lateral y erosión por flujo torrencial. Los resultados señalaron incrementos abruptos en el caudal, socavación profunda en taludes y pérdida parcial de la plataforma vial en varios puntos. INDECI concluyó que la carretera presentó vulnerabilidad alta ante eventos torrenciales, recomendando la ejecución de obras de protección marginal y reconformación de taludes.

3.2 Marco teórico

3.2.1 Teorías del análisis hidrodinámico.

El análisis hidrodinámico forma la base científica para comprender y entender cómo es el comportamiento del flujo de agua en un río y cómo interactúa con la infraestructura cercana. Este análisis permite modelar cuantitativamente la relación entre caudal, velocidad, profundidad, pendiente hidráulica y rugosidad del canal aspectos estudiados y desarrollados por la hidráulica clásica Chow (1959); Henderson (1966), además, estos parámetros permiten predecir áreas de desbordamiento y estimar niveles de amenaza de inundación y vulnerabilidad física, siguiendo los enfoques de riesgo y fragilidad estructural Cutter (2003).

3.2.1.1 Hidrodinámica de Saint-Venant

Las ecuaciones de Saint-Venant. (1871), forman la base matemática para modelar el flujo no permanente en canales abiertos, permitiendo describir las variaciones de caudal, velocidad y profundidad a lo largo del cauce.

Ecuaciones de Saint-Venant



Las ecuaciones de Saint Venant son un conjunto de ecuaciones diferenciales parciales que describen como es el flujo de agua en cauces abiertos y canales bajo el régimen de aguas superficiales. Estas ecuaciones son una reducción de las ecuaciones completas de Navier-Stokes y se basan en los principios de conservación de masa y cantidad de movimiento. Son muy importantes para modelar dinámicas de flujos bidimensionales y unidimensionales en Iber. Riquero, (2020).

Amaris, Guerrero y Sánchez. (2015), en su artículo científico "Comportamiento de las ecuaciones de Saint-Venant en 1D y aproximaciones para diferentes condiciones en regímenes estacionarios y variables", destaca la importancia de la investigación sobre la aplicabilidad de las ecuaciones de Saint-Venant para un mejor entendimiento del flujo en análisis de modelos de tránsito hidráulico a través del análisis y simulación del fenómeno. Se analiza el comportamiento de las ecuaciones en 1D bajo diferentes condiciones de un caso real revisando las aplicaciones y usos de estas ecuaciones matemáticas. Se abordan experimentos numéricos computacionales en una sección de canal con una sección hidráulica prismática con las tres pendientes de canal para este propósito, con pendiente de canal supercrítica, subcrítica y horizontal como los tres escenarios de pendiente de flujo basados en la tasa de flujo de referencia, uno de los otros parámetros más significativos.

Ecuación de tránsito dinámico:

$$\left(\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t}\right) + \left(\frac{1}{A} \frac{\partial Q^2}{\partial x}\right) + \left(g \frac{\partial y}{\partial x}\right) - (gS_o) + (gS_f) = 0 \quad (1)$$

Ecuación de continuidad (Conservación de masa):

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q$$

Donde:

- A: Área mojada de la sección transversal (m²).
- Q: Caudal volumétrico (m³/s).
- x: Dirección longitudinal del cauce (m).
- t: Tiempo (s).
- q: Flujo lateral (aportes o extracciones) por unidad de longitud (m²/s).

Ecuación de cantidad de movimiento (Conservación del momento)



$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA(S_o - S_f)$$

Donde:

- Q: Caudal volumétrico (m³/s).
- A: Área mojada (m²).
- g: Aceleración de la gravedad (9.81 m/s²).
- h: Tirante de agua o altura de la lámina (m).
- S₀: Pendiente del lecho del canal (sin unidades).
- S_f: Pendiente de fricción (sin unidades).

Ecuación de la pendiente de fricción (S_f)

$$S_f = \frac{n^2 Q^2}{R^{4/3} A^2}$$

Donde:

- n: Coeficiente de rugosidad de Manning (sin unidades).
- R: Radio hidráulico (A/P, donde A es el área mojada y P el perímetro mojado, ambos en metros).

3.2.1.2 Ecuación empírica de Gauckler–Manning (Rugosidad del cauce)

Maning (1891), propone la ecuación que permite determinar la velocidad del flujo en función de la rugosidad y la pendiente del canal. Este modelo es ampliamente utilizado en la hidráulica de ríos debido a su capacidad para determinar la energía del flujo.

Las ecuaciones de Saint-Venant combinadas con la fórmula de Gauckler-Manning son muy utilizadas en la modelización hidráulica para describir el comportamiento del flujo en canales abiertos. Este enfoque permite resolver flujos subcríticos y supercríticos, integrando la resistencia al flujo basada en la rugosidad del lecho y las propiedades geométricas de la sección del canal.

$$Q_{i+1}^j = \frac{\frac{\Delta t}{\Delta x} Q_i^j + ab Q_{i+1}^{j-1} \left(\frac{Q_{i+1}^{j-1} + Q_i^j}{2} \right)^{b-1} + \Delta t \left(\frac{q_{i+1}^j + q_{i+1}^{j-1}}{2} \right)}{\frac{\Delta t}{\Delta x} Q_i^j + ab \left(\frac{Q_{i+1}^{j-1} + Q_i^j}{2} \right)^{b-1}}$$

FUENTE — (Amaris, Guerrero y Sánchez, 2015, P. 5)

Figura 1 — Ecuación aproximación numérica para calcular el flujo Q_{i+1}^j .

Tabla 2 — Coeficiente de Manning

Uso de suelo	Clave	Coeficiente de <i>Manning</i>
Pastizal cultivado	PC	0,030
Agricultura de temporal	TA	0,035
Corrientes de agua	CA	0,025
Tular	VT	0,070
Acumulaciones de agua	Ac	0,040
Agricultura semipermanente	TS	0,040
Vegetación secundaria	VS	0,035
Asentamientos humanos	AH	0,020
Zonas urbanas	ZU	0,015

Fuente — (Gutiérrez et al., 2022, P. 9)

Términos de la ecuación

1. Índices

- j : Representa el índice temporal, indicando el paso de tiempo actual (número de iteración en el tiempo).
- i : Representa el índice espacial, correspondiente a un nodo o celda en la malla espacial.
- $i+1$: Indica el nodo siguiente en la dirección espacial.

2. Variables y parámetros

- Q_i^j : Flujo en el nodo i en el instante de tiempo j .
- Q_{i+1}^{j-1} : Flujo en el nodo $i+1$ en el instante de tiempo anterior ($j-1$).
- Q_{i+1}^j : Caudal o aporte externo (como una fuente) en el nodo $i+1$ en el instante de tiempo j .
- Δt : Paso temporal, indica el intervalo de tiempo entre los pasos $j-1$ y j .
- Δx : Espaciado entre nodos en la malla espacial.

a, b : Parámetros relacionados con las características del sistema hidráulico. Podrían depender de la pendiente, rugosidad, o comportamiento físico del flujo.

3.2.1.3 Hidráulica de canales abiertos

Chow (1959), estableció el flujo básico de canales abiertos, describiendo fenómenos fundamentales del flujo como la velocidad, el caudal, la energía específica, el gradiente hidráulico y los regímenes de flujo (subcrítico y supercrítico). Estos permiten identificar claramente la transición entre condiciones de alta energía que pueden causar erosión y socavación.

Esta teoría es una base muy importante en los indicadores utilizados en este trabajo: caudal modelado, profundidad máxima, velocidad del flujo y número de Froude, determinando su impacto físico en el daño a la infraestructura vial.

3.2.2 Análisis hidrodinámico.

El análisis hidrodinámico se comprende y entiende como el estudio del comportamiento del flujo de agua en canales abiertos, centrándose en la interacción entre el caudal, la velocidad, la profundidad y las características geométricas del canal. Este estudio o análisis permite comprender cómo actúan las fuerzas hidráulicas sobre los elementos expuestos en la ribera de los ríos, especialmente en los lugares o áreas donde la infraestructura vial está cerca del canal. Según Chow (1959), el análisis hidrodinámico compone los principios de flujo permanente y no permanente, permitiendo representar el comportamiento tridimensional del agua a través de ecuaciones que consideran la energía, el momento y la continuidad.

De manera similar, según Saint-Venant(1871), el comportamiento del flujo está presidido por las leyes de conservación de la masa y el momento, lo que permite la modelización numérica del desplazamiento del agua bajo las diferentes condiciones de pendiente, rugosidad y geometría del canal. Estas ecuaciones son la base física que permite interpretar los procesos como inundaciones, erosión, desbordamientos e impacto en estructuras.

El análisis hidrodinámico se operacionaliza a través de la modelización numérica en 2D realizada y procesada en el software Iber, una herramienta que permite la representación espacial de toda la distribución del flujo, la identificación de zonas de concentración de energía y la estimación de parámetros hidráulicos críticos que determinan la vulnerabilidad vial de la carretera.

3.2.3 Dimensiones del análisis hidrodinámico.

3.2.3.1 Caudal

El caudal es el volumen de agua que pasa o transcurre por una sección transversal del río por unidad de tiempo, generalmente expresado en metros cúbicos por segundo (m^3/s). Representa uno de los parámetros más importantes para caracterizar el flujo, ya que determina la magnitud del volumen transportado y la capacidad del río para ejercer fuerzas sobre sus márgenes. Según Chow (1959), el caudal está influenciado por la pendiente, la rugosidad del lecho del río y la geometría del canal, elementos que pueden modificar significativamente la energía del flujo durante eventos de desbordamientos e inundación.

En el análisis hidrodinámico del río Chalhuanca, el caudal modelado permite identificar todo el comportamiento del flujo ante las condiciones extremas, así como detectar, mapear e identificar las zonas donde el incremento del volumen transportado puede provocar desbordes y daños estructurales a la vía.

3.2.3.2 Profundidad

La profundidad del flujo es la distancia vertical entre la superficie libre del agua y el fondo del cauce. De acuerdo con Henderson (1966), la profundidad es un parámetro esencial para determinar la energía específica y la capacidad erosiva del flujo, ya que está relacionada con la presión ejercida sobre las orillas y la estabilidad de las pendientes del río. El aumento de la profundidad durante eventos de inundación incrementa la fuerza lateral sobre las orillas, lo que aumenta la amenaza de desbordamiento o socavación. La presente investigación utiliza modelado en 2D para desarrollar mapas espaciales de profundidad identificando puntos críticos donde la infraestructura vial está expuesta al impacto directo del flujo.

3.2.3.3 Velocidad

La velocidad del flujo es la distancia recorrida por una partícula de agua por unidad de tiempo (m/s). Según Chow (1959), este parámetro juega un papel importante en la evaluación de la capacidad del agua para transportar sedimentos, erosionar pendientes y crear esfuerzos cortantes en estructuras

cercanas a un canal. En áreas de alta velocidad, el riesgo de daño aumenta, ya que el flujo experimenta un proceso destructivo más intenso debido al impacto cinético.

Asimismo, Fletcher (1986), las velocidades que superan ciertos umbrales también amenazan con desplazar materiales protectores o generar turbulencias que desestabilizan el canal y las obras adyacentes. La velocidad de flujo calculada utilizando el modelo hidrodinámico Iber es un indicador destacado a partir del cual se puede correlacionar la intensidad del flujo con posibles daños en las carreteras.

3.2.4 Selección de teorías y modelos relevantes variable dependiente

3.2.4.1 Modelo de vulnerabilidad estructural (UNDRO/FEMA)

UNDRO (1982), define la vulnerabilidad como el grado de pérdida esperada en una infraestructura expuesta ante un fenómeno natural de una intensidad específica. En el caso de infraestructura vial, la vulnerabilidad depende de la exposición de la plataforma, la estabilidad de taludes y la cercanía a zonas de erosión activa.

3.2.4.2 Fragilidad estructural (HAZUS)

FEMA (2016), propone un enfoque para estimar la probabilidad de daño estructural mediante curvas de fragilidad. Aplicado a carreteras, este modelo evalúa el daño como una función de la intensidad del flujo, la energía hidráulica y los parámetros geométricos de la vía.

3.2.4.3 Análisis de vulnerabilidad y riesgo

CENEPRED (2014), define la vulnerabilidad como la combinación de fragilidad física y exposición. El método peruano considera factores como: proximidad al cauce, procesos de erosión activa, pendiente del talud y recurrencia de desbordes.

3.2.5 Vulnerabilidad de la infraestructura vial

La vulnerabilidad de la infraestructura vial se entiende usualmente como el grado en que una carretera falla o puede sufrir daños por eventos naturales (principalmente asociados con procesos hidrológicos e hidrodinámicos). Según UNDRO (1982),

vulnerabilidad denota la probabilidad de pérdida o deterioro de un elemento expuesto bajo riesgo de impacto de un evento de cierta intensidad. En cuanto a las infraestructuras viales, esa pérdida puede referirse a la erosión de taludes, socavación, pérdida de plataforma, colapso estructural o interrupción del tráfico vial. En este contexto, la vulnerabilidad de la carretera también se examina según las características físicas en términos de la ubicación de la carretera en relación con el cauce del río, la composición del suelo, la estabilidad de las pendientes y la recurrencia de los procesos fluviales por parte del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) MTC (2020), es decir, la degradación de la carretera depende no solo de la magnitud del evento, sino también de las características intrínsecas de la infraestructura y del entorno en el que se encuentra. Con esto en mente, el presente trabajo proporciona un estudio sobre la vulnerabilidad de la infraestructura vial con referencia a tres dimensiones básicas: daño estructural, la amenaza fluvial y el índice de vulnerabilidad vial; están directamente relacionados con parámetros hidrodinámicos encontrados a través de modelado numérico.

3.2.6 Dimensiones de la vulnerabilidad de la infraestructura vial

3.2.6.1 Daños estructurales

Los daños estructurales representan las afectaciones físicas y materiales que experimenta una vía cuando es impactada por un flujo fluvial intenso. De acuerdo con FEMA (2016), el daño estructural puede manifestarse en pérdida de soporte, erosión lateral, saturación del terreno, desprendimiento de taludes, deformaciones en la plataforma y colapso parcial o total de la infraestructura. En zonas cercanas al cauce, la fuerza del agua actúa directamente sobre los taludes y superficies expuestas, generando procesos de socavación que pueden comprometer la estabilidad de la carretera. Autores como Richards. (2011), señalan que el daño estructural depende de la energía hidráulica del flujo, la cual es función de la velocidad, profundidad y características geomorfológicas de la ribera.

En esta investigación, los daños estructurales se identificaron mediante inspección de campo, registro fotográfico y análisis de la evolución erosiva, permitiendo asociar los parámetros hidrodinámicos con las afectaciones observadas en la vía.



3.2.6.2 Amenaza fluvial

La amenaza fluvial se define como la probabilidad de que un evento hidrológico e hidrodinámico, como un desborde o flujo crítico, impacte una determinada área generando consecuencias adversas. Según CENEPRED (2014), la amenaza está relacionada directamente con la intensidad del fenómeno y se expresa en parámetros medibles como el caudal pico, velocidad, profundidad y número de Froude.

Un flujo supercrítico ($Fr > 1$), tal como indican Arcement y Schneider (1989), posee alta energía específica, lo que lo convierte en un agente de erosión severo capaz de socavar materiales de protección, taludes y estructuras laterales. De este modo, la amenaza fluvial integra la magnitud del fenómeno hidrodinámico y las características físicas del cauce, representando una dimensión esencial para comprender la exposición de la carretera.

En el caso del río Chalhuanca, la amenaza fluvial se evalúa mediante modelación hidrodinámica 2D, identificando tramos donde se concentran velocidades elevadas, profundidades críticas o regímenes supercríticos que incrementan la probabilidad de daño.

3.2.6.3 Índice de vulnerabilidad

El índice de vulnerabilidad vial es un valor cualitativo ordinal que sintetiza los niveles de susceptibilidad de la carretera ante el impacto de procesos fluviales. Este índice integra los factores de exposición, fragilidad y amenaza, permitiendo clasificar el grado de vulnerabilidad en categorías como muy baja, baja, media, alta y muy alta.

Según Cutter (2003), los índices de vulnerabilidad combinan características físicas, ambientales y estructurales para representar el estado de riesgo de una infraestructura. En el ámbito peruano, CENEPRED. (2014) y el MTC (2020), recomiendan utilizar índices multivariable que relacionen condiciones físicas de la infraestructura con los parámetros asociados a la amenaza.

En esta investigación, el índice de vulnerabilidad vial se obtiene a partir del análisis de diez puntos críticos identificados en campo, integrando información hidrodinámica (velocidad, profundidad, Froude), condiciones geomorfológicas (erosión, taludes) y la respuesta física de la vía ante eventos extremos.

3.2.7 Modelo seleccionado

Se selecciona la teoría de Saint-Venant para el análisis hidrodinámico debido a su capacidad de simular el flujo en condiciones reales del río. Para la evaluación de vulnerabilidad, se adopta el modelo de UNDRO/FEMA por su estructura analítica y su pertinencia en infraestructuras lineales expuestas.

3.2.8 Modelo conceptual

El modelo conceptual del estudio se basa en la premisa de que las variables hidrodinámicas (caudal, velocidad, profundidad, número de Froude y pendiente hidráulica) determinan el nivel de amenaza fluvial, la cual, en combinación con la exposición y fragilidad de la infraestructura vial UNDRO (1982); FEMA. (2021), resulta en un nivel específico de vulnerabilidad.

3.2.9 Definición y operacionalización de conceptos

3.2.9.1 Análisis hidrodinámico

Basado en Saint-Venant (1871) y Maning (1891), el análisis hidrodinámico comprende la caracterización del flujo mediante parámetros cuantitativos obtenidos a través de modelación numérica.

3.2.9.2 Vulnerabilidad vial

De acuerdo con UNDRO (1982), la vulnerabilidad se cuantifica a partir del grado de exposición y fragilidad ante una amenaza. FEMA (2021), establece metodologías para clasificarla en niveles y determinar medidas de mitigación.

3.2.10 Justificación de la selección teórica

La teoría de Saint-Venant se selecciona debido a la necesidad de representar matemáticamente el comportamiento dinámico del flujo durante eventos de crecida. La ecuación de Manning complementa esta representación al asociar rugosidad y pendiente con energía hidráulica. El modelo de UNDRO/FEMA es el más adecuado para describir la vulnerabilidad vial, dado su enfoque integral basado en exposición y fragilidad.

3.3 Marco conceptual

- a) **Infraestructura vial.** El conjunto de elementos físicos, funcionales y estructurales destinados a permitir el tránsito seguro y continuo de personas, vehículos y mercancías, Briceño y Mendoza, (2022).
- b) **Hidrodinámica.** Rama de la mecánica de fluidos que estudió el movimiento del agua y las fuerzas que se generaron durante dicho movimiento, Chow (1959).
- c) **Caudal modelado.** Volumen de agua simulado que atraviesa una sección del cauce por unidad de tiempo, Chow (1959).
- d) **Caudal máximo de crecida.** Es el mayor valor de caudal registrado o estimado durante un evento de avenida o incremento súbito del nivel del río, Henderson F. M. (1966).
- e) **Puntos críticos de anegación.** Corresponden a los sectores del cauce donde la profundidad del agua supera niveles que comprometen la estabilidad o funcionalidad de la infraestructura vial, Chow (1959).
- f) **Afectaciones a la vía por inundación.** Condición en la cual la profundidad del flujo alcanza o supera partes de la plataforma vial, provocando pérdida de operatividad, erosión superficial o interrupción del tránsito, MTC (2020).
- g) **Profundidad máxima del flujo.** Es el valor máximo de la lámina de agua obtenido en la simulación hidrodinámica, Henderson (1966).
- h) **Flujo de direcciones.** Representa la orientación espacial del movimiento del agua dentro del cauce, Fletcher (1986).
- i) **Velocidad del flujo.** Es la distancia recorrida por el agua por unidad de tiempo y constituye un indicador fundamental para evaluar la intensidad de la energía cinética del río, Chow (1959).



- j) **Desbordes fluviales.** Ocurren cuando el caudal y la profundidad del flujo superan la capacidad del cauce, produciendo derrames hacia áreas adyacentes, incluida la plataforma vial, FEMA (2016).
- k) **Daños laterales.** Son las afectaciones que se producen en las partes laterales de la vía (bermas, taludes, drenajes, terraplén) debido al impacto directo del flujo o a la erosión continua, MTC (2020).
- l) **Erosión del talud.** Consiste en el desgaste progresivo del material que forma los taludes adyacentes a la vía, provocado por la acción del flujo, Fletcher G.(1986).
- m) **Colapso.** Es el deterioro severo o pérdida total de un tramo de la infraestructura vial, provocado por el socavamiento, erosión profunda o impacto de flujos concentrados, FEMA (2016).
- n) **Régimen hidráulico.** Describe el comportamiento del flujo (laminar, turbulento, uniforme, variado) en función de parámetros como caudal, pendiente y rugosidad, Chow (1959).
- o) **Pendiente hidráulica.** Es la relación entre la pérdida de energía por fricción y la longitud del cauce, Henderson (1966).
- p) **Número de Froude (Fr).** Es un parámetro adimensional que permite clasificar el tipo de flujo: $Fr < 1$: subcrítico, $Fr = 1$: crítico, $Fr > 1$: supercrítico, Un flujo supercrítico ($Fr > 1$) es altamente erosivo y constituye un indicador clave de peligrosidad fluvial, Chow (1959).
- q) **Zonas con flujo supercrítico.** Son áreas donde el valor del número de Froude supera la unidad, indicando mayor velocidad, menor profundidad y alto potencial de erosión y socavación, CENEPRED(2014).
- r) **Nivel de vulnerabilidad por punto crítico.** Es la valoración cualitativa asignada a cada punto evaluado (muy baja, baja, media, alta, muy alta), integrando la información hidrodinámica, estructural y geomorfológica, Cutter (2003)

- s) **Clasificación de niveles.** Es la categorización sistemática de los puntos críticos según intervalos cualitativos u ordinales, CENEPRED (2014).



CAPÍTULO IV

METODOLOGÍA

4.1 Tipo y nivel de investigación

Tipo de investigación:

El estudio correspondió al tipo de investigación aplicada, ya que se orientó a resolver un problema práctico relacionado con los impactos de los desbordes fluviales con la evaluación de la vulnerabilidad de la infraestructura vial ante desbordes fluviales en el tramo km 336+950 al 340+950 del río Chalhuanca. Según Bernal (2010), la investigación aplicada se caracteriza por utilizar conocimientos científicos para intervenir y solucionar problemas prácticos, generando resultados que tienen utilidad directa en un contexto determinado. La relación entre esta definición y la presente investigación es directa, puesto que el análisis hidrodinámico se empleó para generar modelos predictivos y evaluar escenarios de desbordamientos que permitan identificar la vulnerabilidad de la infraestructura vial. De esta manera, el estudio aplicó modelos numéricos basados en las ecuaciones de Saint-Venant y datos históricos hidrológicos para ofrecer soluciones técnicas orientadas a la prevención y mitigación de riesgos en la vía nacional PE-30A. Por ello, el enfoque aplicado se ajustó plenamente al objetivo práctico del trabajo.

Nivel de investigación

El nivel de la investigación de este estudio es correlacional. La investigación correlacional se caracteriza por examinar la relación estadística entre dos o más variables observadas tal como ocurren en su contexto natural, sin que el investigador manipule ni controle estas variables. En este tipo de estudios, el análisis se centró en medir el grado, la dirección y la fuerza de la asociación entre variables cuantitativas mediante técnicas estadísticas, pero no permitió establecer relaciones de causalidad directa entre ellas Bhandari, (2021).

De acuerdo con la definición adoptada, en esta investigación se observaron y midieron las variables del análisis hidrodinámico del río Chalhuanca como caudal, velocidad, profundidad y la vulnerabilidad de la infraestructura vial ante desbordes fluviales, sin manipulación experimental de ninguna de ellas. Los datos fueron recolectados mediante

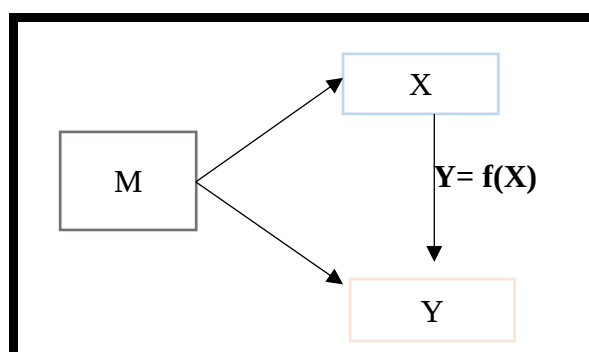
observación directa y revisión histórica, y se emplearon técnicas estadísticas como regresión lineal para identificar patrones de asociación entre las variables hidrodinámicas y la vulnerabilidad vial. Esto se ajusta a la lógica de un estudio correlacional, porque se buscó determinar si existe una asociación cuantificable entre las variables del análisis hidrodinámico y el nivel de vulnerabilidad, así como cuánto varía la variable dependiente en función de los cambios observados en las variables independientes, sin afirmar que una cause directamente a la otra.

4.2 Diseño de la investigación

El presente estudio adoptó un diseño no experimental, transversal. En primer lugar, es no experimental porque no se manipulan las variables independientes, sino que se estudian los fenómenos tal como ocurren en su contexto natural. Según Hernández, Fernández, Baptista (2014), señalan que el diseño no experimental se caracteriza por observar las variables sin intervención del investigador, limitándose a analizar las relaciones existentes entre ellas. Asimismo, el diseño es transversal, dado que la recolección y el análisis de los datos se realizan durante un periodo concreto (año 2025), sin observar cambios a lo largo del tiempo. Según Dankhe (1986), los estudios transversales analizan fenómenos en un único momento para describir, detallar o explicar relaciones entre variables.

La investigación adoptó este diseño porque utiliza simulaciones hidrodinámicas y análisis estadístico-predictivo para explicar cómo ciertas condiciones del flujo fluvial incrementan la vulnerabilidad en los puntos críticos del tramo estudiado.

Esquema básico del diseño de investigación



M: Muestra.

X: variable independiente (análisis hidrodinámico).

Y: Variable dependiente (vulnerabilidad de infraestructura vial).

Y= f(X) (La determinación de la vulnerabilidad está en función al análisis hidrodinámico).

4.3 Descripción ética de la investigación

La investigación se enmarca dentro de un riguroso compromiso ético que manifiesta a estándares internacionales, nacionales y locales, orientados a asegurar la integridad científica, la responsabilidad social y el respeto por el medioambiente y la comunidad afectada por los desbordes fluviales.

A nivel internacional, el desarrollo de investigaciones con implicancias en seguridad pública, en gestión del riesgo y evaluación de amenazas naturales se fundamenta en los principios éticos establecidos por Belmont Report (1979), documento base para la conducta investigadora. Este marco forma los principios de respeto por las personas, beneficencia y justicia, los cuales obligan a todos los investigadores a proteger la integridad humana, evitar daños previsibles y asegurar que los beneficios del conocimiento se distribuyan de manera equitativa. En el contexto del análisis hidrodinámico para determinar la vulnerabilidad ante desbordes fluviales en el río Chalhuanca, estos principios se concretan en la obligación de garantizar que el modelado hidrodinámico, el análisis de riesgo y la interpretación de resultados contribuyan verdaderamente a la seguridad de la población local, evitando sesgos que puedan afectar decisiones públicas relacionadas con obras de protección, gestión del riesgo hídrico o intervención en infraestructura vial expuesta.

En el ámbito nacional, la ética de investigación científica está regulada reglamentada por diversas instituciones académicas y normativas que establecen principios orientados a garantizar integridad, transparencia y responsabilidad social. Entre ellas, destaca el Código de Ética para la Investigación Científica de la Universidad Peruana Los Andes (2019), el cual enfatiza la honestidad en el manejo de datos, la veracidad en la presentación de resultados y la obligación de evitar cualquier forma de manipulación o distorsión científica. Este marco es plenamente aplicable en investigaciones técnico-científicas como el análisis hidrodinámico del río Chalhuanca, donde la precisión en los caudales, velocidades, profundidades y resultados de modelación es fundamental para evitar conclusiones erróneas que pudieran afectar la seguridad vial o la toma de malas decisiones públicas. Asimismo, instituciones como CONCYTEC y diversas universidades peruanas demandan que los estudios respeten el entorno ambiental y social donde se desarrollan, lo cual es fundamental cuando se evalúan fenómenos naturales con impacto directo en comunidades vulnerables.



A nivel local, la Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac (UNAMBA) dispone de principios éticos institucionales que orientan la investigación hacia la transparencia, la responsabilidad social, la rigurosidad científica y el respeto al entorno natural y social. Su Código de Ética en Investigación, aprobado por el Vicerrectorado de investigación, establece que toda actividad investigadora debe proteger a la comunidad, utilizar responsablemente los recursos universitarios y asegurar que los resultados sean veraces y verificables UNAMBA (2018), en la presente investigación centrada en la vulnerabilidad de la infraestructura vial ante desbordes del río Chalhuanca estos principios se concretan en el compromiso de presentar simulaciones hidrodinámicas verificables, respetar la información topográfica y ambiental recolectada en campo y garantizar que los resultados contribuyan a la reducción del riesgo fluvial que afecta directamente a los habitantes de Chalhuanca y zonas adyacentes; su existencia demuestra un compromiso institucional con la ética científica, la transparencia, la responsabilidad social y el respeto hacia el entorno donde se realiza la investigación.

Desde una perspectiva integral, la investigación demostró un compromiso ético sólido, coherente con los estándares internacionales, nacionales y locales. La aplicación estricta de los principios del Belmont Report asegura que el estudio contribuya a la seguridad y bienestar de la población expuesta a los desbordes del río Chalhuanca. El respeto a las normas éticas nacionales garantiza que el manejo de datos topográficos, geotécnicos e hidrológicos sea transparente, verificable y científicamente riguroso. Finalmente, la alineación con el Código de Ética de la UNAMBA reforzó el compromiso social del estudio, asegurando que la elaboración del modelo hidrodinámico, los análisis estadísticos y la identificación de niveles de vulnerabilidad se lleven a cabo con responsabilidad institucional y respeto por el entorno. Se concluye, por tanto, que la ética no constituye un requisito formal, sino un componente esencial que fortalece la credibilidad, la utilidad pública y la pertinencia social de la investigación.

4.4 Población y muestra

Población

En el presente estudio, la población estuvo conformada por todos los tramos de infraestructura vial ubicados entre el Km 339+200 y Km 343+200 del río Chalhuanca, así como las características hidrodinámicas asociadas a este cauce, que son objeto de análisis para evaluar su vulnerabilidad ante desbordes fluviales.



Para delimitar con precisión la población se han establecido criterios de inclusión y exclusión, siguiendo las recomendaciones metodológicas de SAMPIERI, et. al (2014).

➤ **Criterios de inclusión:**

Los criterios de inclusión se dieron en los tramos de carretera situados dentro del tramo Km 339+200 y Km 343+200 del río Chalhuanca definido en los objetivos de la investigación. Sectores cuya infraestructura vial presente documentación disponible y levantamientos topográficos recientes. Áreas con registros de caudal, velocidad y profundidad del agua que permitan realizar un análisis hidrodinámico confiable.

Se considero en este tramo ya que hay antecedentes de desbordamientos, daños que vienen afectando la infraestructura vial, y también dentro de este tramo se encuentra el casco urbano de Chalhuanca.

➤ **Criterios de exclusión:**

Se excluyeron los tramos de carretera que se encuentran fuera del rango Km 339+200 al Km 343+200, debido a que no forman parte del ámbito espacial definido en los objetivos del estudio.

Áreas sin información suficiente sobre la infraestructura vial o sin registros hidrológicos confiables.

Sectores intervenidos recientemente por obras de emergencia que alteren significativamente las condiciones naturales del flujo del río, impidiendo un análisis representativo.

La aplicación de estos criterios permite definir una población específica, homogénea y representativa, sobre la cual se puede realizar un análisis correlacional robusto entre el análisis hidrodinámico y la vulnerabilidad de la infraestructura vial. Esto garantiza que los resultados obtenidos sean relevantes, confiables y aplicables para la planificación de medidas preventivas y de mitigación en el tramo de estudio.

Muestra

La muestra de la investigación estuvo constituida por los 10 puntos identificados en el tramo Km 339+200 al Km 343+200 del río Chalhuanca, los cuales presentan condiciones

relevantes para el análisis hidrodinámico y la evaluación de la vulnerabilidad de la infraestructura vial. Estos puntos, codificados como P-01 a P-10, fueron seleccionados en función de criterios técnicos relacionados con la disponibilidad de información hidrológica, la presencia de afectación estructural potencial y la exposición a procesos de desborde fluvial.

Debido a las características del diseño metodológico, la muestra fue determinada mediante un muestreo no probabilístico por criterio, seleccionado porque permite incluir únicamente aquellas unidades que cumplen con las propiedades indispensables para el estudio. Tal como lo señala Otzen y Manterola (2017), este tipo de muestreo consiste en escoger unidades que poseen características específicas y esenciales para el análisis, permitiendo que la selección responda al juicio técnico del investigador y a la pertinencia de las unidades respecto a los objetivos planteados.

En esta investigación, los diez puntos seleccionados representaron las unidades donde coinciden datos estructurales y datos hidrodinámicos, tales como velocidad del flujo, profundidad, caudal, régimen hidráulico y condiciones geomorfológicas del cauce. Su elección obedece a la necesidad de contar con información completa y verificable que permita estimar daños estructurales potenciales, identificar factores de amenaza fluvial y determinar el índice de vulnerabilidad vial con precisión. Por ello, la muestra total del estudio está conformada por 10 unidades de análisis, las cuales permiten cumplir de manera íntegra los objetivos específicos y garantizar la validez técnica del análisis hidrodinámico aplicado a la infraestructura vial del ramo evaluado.

Tabla 3 — Tabla de elementos de la muestra.

PUNTOS	ESTE	NORTE	COTA
P-01	687734,00	8419554,00	2910,00
P-02	688131,00	8419390,00	2912,00
P-03	688475,00	8419146,00	2919,00
P-04	688875,00	8418991.86	2925,00
P-05	689254,00	8418764,00	2932,00
P-06	689695,00	8418632,00	2940,00
P-07	690112,00	8418370,00	2942,00
P-08	690576,00	8418111,00	2948,00
P-09	690975,00	8417872,00	2957,00
P-10	691386,00	8417941,00	2962,00

Muestreo

El muestreo empleado en la presente investigación correspondió a un muestreo no probabilístico por criterio, el cual se caracteriza porque la selección de las unidades de análisis depende del juicio técnico del investigador y de la pertinencia que cada unidad presenta para los objetivos del estudio. En este tipo de muestreo, las unidades no poseen una probabilidad igual de ser elegidas; por el contrario, son seleccionadas en función de características específicas que las hacen relevantes para el fenómeno analizado. Según Otzen y Manterola (2017), el muestreo por criterio consiste en “elegir a los sujetos o unidades que cumplen características previamente definidas por el investigador, las cuales son esenciales para el análisis”.

En coherencia con esta definición, el muestreo aplicado se fundamenta en la selección de los puntos críticos del tramo vial y del cauce del río Chalhuanca que presentan condiciones hidrodinámicas particulares, evidencia de afectación estructural o datos técnicos disponibles para la evaluación. Por ello, las unidades incluidas en la muestra corresponden exclusivamente a los puntos donde el análisis hidrodinámico y la vulnerabilidad vial pueden integrarse, asegurando que su elección responda directamente a los requerimientos metodológicos de la investigación.

4.5 Procedimiento

El procedimiento de la investigación se desarrolló de manera secuencial y articulada con los objetivos planteados, integrando las dos variables principales: el análisis hidrodinámico y la vulnerabilidad de la infraestructura vial. En primer lugar, se delimitó el tramo crítico del río Chalhuanca, identificando los sectores con evidencia de daños y riesgo de desbordes, lo cual permitió contextualizar el problema dentro de un marco explicativo Hernandez, et. al (2014).

Posteriormente, se recopiló información hidrológica, topográfica y geomorfológica necesaria para la modelación. Este proceso incluyó la obtención de perfiles transversales, características del cauce y datos de régimen hidráulico, siguiendo criterios técnicos propuestos por Chow (1959), para estudios de flujo en canales naturales. Con esta información se elaboró el modelo digital del terreno y se ejecutó la simulación hidrodinámica, permitiendo determinar caudales máximos, velocidades, profundidades y zonas de desborde.



A continuación, se evaluó la vulnerabilidad de la infraestructura vial, relacionando los resultados hidrodinámicos con la exposición y fragilidad estructural de los diez puntos críticos del tramo estudiado, conforme a estándares utilizados en investigaciones similares sobre infraestructura expuesta a procesos fluviales MEDINA (2024), esta integración permitió identificar el nivel de afectación potencial de cada punto; a continuación se muestra el flujograma del procedimiento de la investigación.

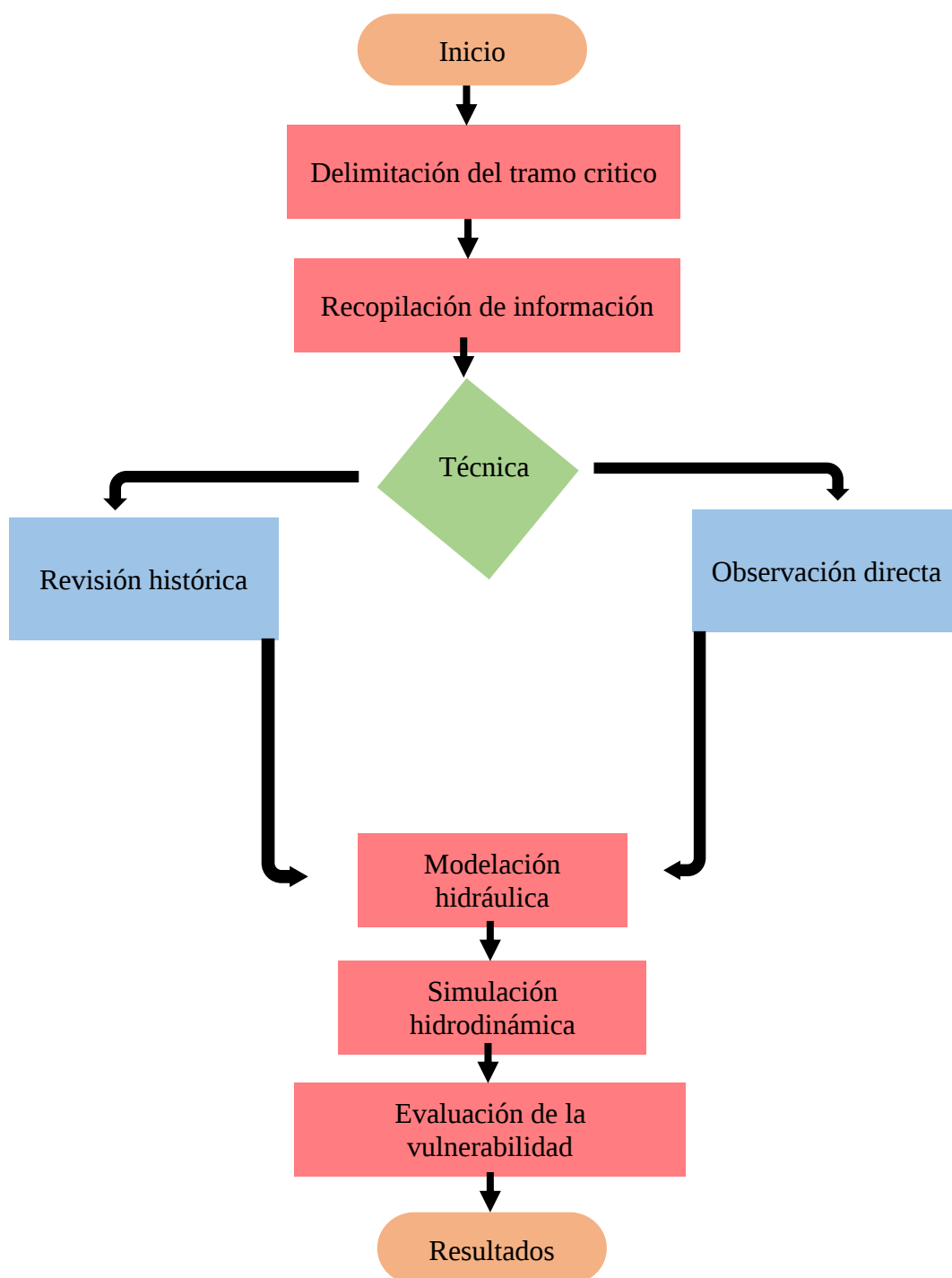


Figura 2 — Flujograma de procedimiento.

4.6 Técnicas e instrumentos

Técnicas

La investigación empleó dos técnicas principales: la revisión histórica y la observación directa en campo. La revisión histórica permitió analizar series temporales de precipitación y registros hidrológicos proporcionados por el SENAMHI, con el fin de comprender el comportamiento del caudal y los eventos de desborde del río Chalhuanca. Esta técnica consiste en examinar datos históricos para identificar patrones, tendencias y condiciones representativas del fenómeno estudiado, lo cual la convierte en un método fundamental para investigaciones hidrológicas Montgomery; Runger (2014).

La observación directa, por su parte, permitió identificar los puntos críticos de la infraestructura vial expuesta a procesos de socavación y desborde, así como verificar las condiciones geomorfológicas e hidráulicas del cauce. Esta técnica posibilita registrar el fenómeno tal como ocurre, sin manipulación de variables, siendo adecuada para estudios con diseño no experimental Avila (2006), ambas técnicas facilitaron integrar la información necesaria para el análisis hidrodinámico y la evaluación de la vulnerabilidad vial en los diez puntos seleccionados.

Instrumentos

El instrumento utilizado fue una ficha técnica estructurada, diseñada para registrar de manera ordenada los datos necesarios del análisis hidrodinámico y de la vulnerabilidad de la infraestructura vial. Según Sampieri, et. al (2014), un instrumento es una herramienta que permite recolectar información de forma sistemática en relación con las variables de estudio.

Para la variable análisis hidrodinámico, la ficha permitió registrar datos históricos de precipitación y caudal obtenidos del SENAMHI, así como mediciones de velocidad, profundidad y características del cauce necesarias para la modelación hidráulica. Para la variable vulnerabilidad vial, el instrumento incluyó campos para documentar la exposición, la presencia de desbordes fluviales, erosión lateral, afectación estructural y condiciones del terreno, información obtenida mediante observación directa en los diez puntos críticos.

El uso de esta ficha técnica aseguró uniformidad en el levantamiento de datos y permitió integrar adecuadamente la información para el análisis del comportamiento fluvial y su impacto en la vía Avila (2006).



Tabla 4 — Instrumentos

Tipo de ficha	Descripción	Variables	Formato
Ficha de registro de características visuales	Registro de características visuales del tramo (Km 339+200 al Km 343+200), como flujo fluvial y taludes.	Flujo fluvial, erosión de taludes, condiciones de infraestructura vial.	- PROGRESIVAS: Inicio, fin - DETALLE: Longitud ancho, tipo de daño.
Ficha para levantamiento topográfico	Levantamiento topográfico del tramo (Km 339+200 al Km 343+200) y ubicación de puntos críticos.	Coordenadas, planos de planta y perfiles, modelo de elevación digital (DEM).	Todos los planos donde se identifican los puntos críticos
Ficha de ensayos de Suelo	Registro de pruebas realizadas en puntos críticos: límite líquido, límite plástico, granulometría para la clasificación de suelos.	Propiedades mecánicas del suelo clasificación y granulométrica.	Tablas con parámetros medidos, valores obtenidos y observaciones adicionales.
Ficha de simulación hidrodinámica	Registro de datos obtenidos durante simulaciones en Iber y HEC-RAS.	Caudales, velocidades del flujo, niveles de agua, mapas de zonas inundables.	Capturas de pantalla, datos tabulares, descripciones del comportamiento del flujo simulado.
Ficha de datos hidrológicos	Registro de datos históricos y actuales del comportamiento del río Chalhuanca.	Precipitaciones, caudales máximos y mínimos, periodos de retorno.	Tablas con datos temporales, gráficos y observaciones relacionadas.

Validación de instrumento

La validación del instrumento consistió en evaluar la pertinencia, coherencia y relevancia de los ítems incluidos en la Ficha de Observación Hidrodinámica y Evaluación de Vulnerabilidad Vial, con el propósito de garantizar que mida de manera adecuada las variables del estudio. La validación de contenido, según Hernandez, et. al (2014), implica someter el instrumento al juicio de especialistas con el fin de determinar si representa adecuadamente los dominios conceptuales que se pretende medir. De forma similar, Kerlinger Y Lee (2002), sostienen que un instrumento es válido cuando refleja con precisión los constructos teóricos que intenta evaluar, asegurando correspondencia entre lo que se desea medir y lo que efectivamente se mide.

En concordancia con estos criterios, la presente investigación sometió el instrumento a la revisión de tres expertos profesionales, quienes cuentan con formación y experiencia en hidrodinámica, infraestructura vial y gestión del riesgo:

Tabla 5 — Validación de instrumento

Experto	Análisis hidrodinámico	Vulnerabilidad
• Mg. Danny D. Saavedra Ore	Aceptable	Aceptable
• Mg. Michel Palma Vargas	Aceptable	Aceptable
• Mg. Danilo Saavedra Ore	Aceptable	Aceptable

Cada experto evaluó la claridad, objetividad, actualidad, consistencia, coherencia metodológica y relevancia territorial del instrumento, mediante una escala de valoración tipo Likert. Sus aportes permitieron confirmar la suficiencia técnica del instrumento, así como ajustar aquellos elementos necesarios para mejorar su aplicación en el análisis hidrodinámico y la evaluación de la vulnerabilidad vial en el tramo del río Chalhuanca.

Confiabilidad del instrumento

Para determinar la confiabilidad del instrumento aplicado la ficha de observación hidrodinámica y evaluación de vulnerabilidad vial se empleó el coeficiente alfa de Cronbach, metodología adecuada para evaluar la consistencia interna de instrumentos. Según Cronbach (1951), este coeficiente permite medir el grado de homogeneidad de los ítems, estableciendo qué tan bien evalúan el mismo constructo. De acuerdo con George y Mallery (2003), un valor de α entre 0.70 y 0.95 se considera aceptable, bueno o excelente para fines de investigación.

El instrumento fue validado por tres expertos; 2 en hidráulica, 1 estructuras:

Tabla 6 — Expertos y el grado académico

Experto	Grado académico
Mg. Danny D. Saavedra Ore	Grado de magíster en ciencias de la ingeniería, mención recursos y medio ambiente hídrico.
Mg. Michel Palma Vargas	Maestro en ingeniería civil mención recursos hídricos y medio ambiente.
Mg. Danilo Saavedra Ore	Maestro en ciencias en ingeniería civil con mención es estructuras.

Se realizó una encuesta a 30 personas en la ciudad de Chalhuanca a las personas que trabajan en la ciudad, cada uno evaluó 30 ítems relacionados con claridad, objetividad, pertinencia técnica y coherencia interna del instrumento que fueron validados por los expertos como se observa en la tabla 6 y se determinó el coeficiente de la siguiente manera.

Cálculo de alfa de Cronbach

$$\alpha = \frac{K}{K-1} \left[1 - \frac{\sum S_i^2}{s_T^2} \right]$$

- α : Coeficiente de alfa de Cronbach.
- K: Numero de ITEMS del instrumento.
- $\sum S_i^2$: Sumatoria de varianza de los ITEMS
- s_T^2 : Varianza total del instrumento

Donde:

- K: = 30
- $\sum S_i^2$: = 13.1567
- s_T^2 : = 111.1122

Reemplazando datos se tiene lo siguiente:

$$\alpha = \left(\frac{30}{30-1} \right) \left[1 - \frac{13.16}{111.11} \right]$$

$$\alpha = 0.9199$$

El coeficiente obtenido ($\alpha = 0.9199$) indica que el instrumento presenta una confiabilidad “buena”, ya que se encuentra dentro del rango aceptable establecido por la literatura ($0.70 \leq \alpha \leq 0.95$). Este valor demuestra que los ítems mantienen coherencia interna y evalúan de manera consistente los aspectos relacionados con: las condiciones hidrodinámicas del río, y la vulnerabilidad de la infraestructura vial.

Por tanto, el instrumento es estadísticamente confiable y adecuado para su aplicación en la presente investigación.

4.7 Análisis estadístico

Criterios de uso de la regresión lineal

a). Tipo de objetivo.

Los objetivos de la investigación fueron de tipo correlacional, orientados a analizar y determinar de qué manera entre el análisis hidrodinámico y la vulnerabilidad de la infraestructura vial ante desbordes fluviales, lo cual justifica el uso de la regresión lineal.

b). Tipo de variables.

Las variables analizadas fueron cuantitativas continuas, tales como profundidad, velocidad, caudal, daños estructurales, amenaza fluvial e índice de vulnerabilidad vial, cumpliendo los supuestos básicos del modelo de regresión lineal.

c). Tipología de datos.

Se trabajó con datos numéricos medidos y simulados, obtenidos mediante modelación hidrodinámica bidimensional y análisis técnico, lo que permitió establecer relaciones matemáticas entre variables.

d). Normalidad de los datos

La normalidad fue evaluada mediante pruebas estadísticas. Aunque algunas variables presentaron desviaciones debido al tamaño muestral ($n = 10$), la regresión lineal resultó válida por la naturaleza física de los procesos analizados y fue confirmada mediante modelo de ajuste con significancia estadística ($p < 0.05$).

Para la verificación de la hipótesis general y de las hipótesis específicas, se empleó la regresión lineal, técnica estadística adecuada para determinar el grado de relación y el efecto predictivo de la variable independiente análisis hidrodinámico sobre la variable dependiente vulnerabilidad de la infraestructura vial. De acuerdo con Montgomery et. al (2015), la regresión lineal permite estimar la influencia de un predictor cuantitativo sobre una variable de respuesta, midiendo la fuerza, dirección y significancia del modelo mediante los coeficientes R , R^2 y el estadístico F .

La selección de esta prueba se justificó por tres razones metodológicas. Primero, ambas variables del estudio fueron medidas de forma cuantitativa, lo cual permite la aplicación de modelos paramétricos basados en correlación y predicción. Segundo, la investigación presenta un diseño no experimental y transversal, por lo que la regresión resulta adecuada para analizar relaciones sin manipulación de variables Hernández et. al (2014), tercero los objetivos de investigación requieren determinar de qué manera el análisis hidrodinámico

influye en la vulnerabilidad, lo que corresponde a un enfoque correlacional, propio de modelos predictivos como la regresión.

El procedimiento estadístico se desarrolló siguiendo la secuencia propuesta por Montgomery et al. (2015).

- Verificación de supuestos del modelo (linealidad, independencia, normalidad y homocedasticidad).
- Estimación del modelo de regresión lineal simple, considerando el análisis hidrodinámico como variable independiente y la vulnerabilidad vial como variable dependiente.
- Evaluación del ajuste del modelo, empleando los coeficientes R y R^2 , con el fin de determinar la fuerza de asociación y la proporción de varianza explicada.
- Contraste de significancia estadística, mediante el estadístico regresión lineal – Ajuste de modelo, que permite determinar si el modelo contribuye significativamente a explicar la variable dependiente.
- Interpretación de los coeficientes, especialmente la pendiente (β), que indica el efecto del análisis hidrodinámico sobre la vulnerabilidad.

Esta metodología permitió contrastar la hipótesis general y las hipótesis específicas mediante los valores obtenidos. El análisis confirmó a través de los coeficientes del modelo y de la significancia estadística que el análisis hidrodinámico posee un efecto directo y significativo sobre la vulnerabilidad de la infraestructura vial, cumpliendo con el objetivo explicativo del estudio.

CAPÍTULO V

RESULTADOS Y DISCUSIONES

5.1 Análisis de los resultados

Los resultados obtenidos en la presente investigación se organizan en función del objetivo general y de los objetivos específicos, siguiendo una estructura ordenada que permite comprender, primero, el comportamiento hidrodinámico del río Chalhuanca y, posteriormente, su incidencia en las dimensiones que conforman la vulnerabilidad de la infraestructura vial.

Resultados del objetivo general

Se tiene por objetivo determinar de qué manera el análisis hidrodinámico influye en la vulnerabilidad de la infraestructura vial ante desbordes fluviales en el tramo Km 339+200 – Km 343+200 del río Chalhuanca, Apurímac, 2025, así mismo está dada de la siguiente manera.

Tabla 7 — Perfil hidráulico obtenido del modelado

GRUPO	Este	Norte	Cota	Profundidad	V_total	Caudal	Pendiente hidráulica	Carga hidráulica
P-01	687734,00	8419554,00	2910,00	2.432	6.012	73.954	0.004656	2911.885225
P-02	688131,00	8419390,00	2912,00	3.9199	5.856	114.772	0.016598	2913.747768
P-03	688475,00	8419146,00	2919,00	3.6094	6.126	110.597	0.013997	2920.914170
P-04	688875,00	8418991.86	2925,00	2.9196	4.973	72.589	0.015829	2926.260255
P-05	689254,00	8418764,00	2932,00	4.1082	3.181	65.348	0.017379	2926.260255
P-06	689695,00	8418632,00	2940,00	8.2234	4.507	185.294	0.004061	2941.035100
P-07	690112,00	8418370,00	2942,00	4.7742	5.764	137.586	0.011291	2943.693210
P-08	690576,00	8418111,00	2948,00	3.4531	6.745	116.455	0.019350	2950.318812
P-09	690975,00	8417872,00	2957,00	2.9302	8.594	125.911	0.011998	2960.764402
P-10	691386,00	8417941,00	2962,00	6.7553	7.428	250.890	0.01086	2964.812160

NOTA

La tabla presenta datos claves del perfil hidráulico en diez puntos del tramo estudiado, incluyendo coordenadas, altitud, profundidad, velocidad total del flujo, caudal, pendiente hidráulica y carga hidráulica.



Tabla 8 — Nivel de vulnerabilidad por puntos de exploración

Grupo	Este	Norte	Cota	Profundidad	V_Total	Número de froude, (Daños estructurales)	Zona critica (Factor de amenaza)	Nivel o índice de vulnerabilidad	Descripción de vulnerabilidad
P-01	687734	8419554,00	2910	2,4320	6,012	0,900	False	2,070	Media
P-02	688131	8419390,00	2912	3,9199	5,856	1,100	True	3,160	Alta
P-03	688475	8419146,00	2919	3,6094	6,126	1,050	True	3,060	Alta
P-04	688875	8418991,86	2925	2,9196	4,973	0,950	False	2,000	Media
P-05	689254	8418764,00	2932	4,1080	3,181	0,850	False	0,000	Muy baja
P-06	689695	8418632,00	2940	8,2234	4,507	1,200	True	3,490	Alta
P-07	690112	8418370,00	2942	4,7742	5,764	1,150	True	3,420	Alta
P-08	690576	8418111,00	2948	3,4351	6,745	1,300	True	3,730	Alta
P-09	690975	8417872,00	2957	2,9302	8,594	1,400	True	4,290	Muy alta
P-10	691386	8417941,00	2962	6,9553	7,428	1,250	True	5,560	Muy alta

NOTA

La tabla muestra el nivel de vulnerabilidad calculado para cada punto de monitoreo en función de tres parámetros hidrodinámicos críticos: el número de Froude, la velocidad total del agua y el caudal. Cada uno de estos parámetros se normaliza mediante una transformación que considera su rango mínimo y máximo, seguida de una raíz cuadrada (exponente 0.5) para dar mayor énfasis a los valores medios y altos, y finalmente se escala a una escala de 0 a 5. El nivel de vulnerabilidad final es el promedio aritmético de estos tres valores normalizados.

Esta metodología permitió identificar y clasificar con mayor precisión las zonas críticas, considerando que una mayor vulnerabilidad se asocia con valores elevados en los parámetros hidrodinámicos, reflejando un mayor riesgo de daño o afectación a la infraestructura vial debido a desbordes fluviales. La clasificación se complementa con una descripción cualitativa que facilita la interpretación y la priorización de intervenciones.

Para este objetivo se integraron los resultados del perfil hidráulico (Tabla 7) con los resultados del nivel de vulnerabilidad por puntos de exploración (Tabla 8).

- La (Tabla 7) muestra que los parámetros hidrodinámicos presentan una variación significativa a lo largo del tramo estudiado. Las profundidades varían entre 2.43 m y 8.22 m, las velocidades entre 3.18 m/s y 8.59 m/s, y los caudales entre 65.35 m³/s y 250.89 m³/s. Estos valores evidencian la presencia de sectores con alta energía hidráulica, principalmente en los puntos P-06, P-09 y P-10.
- Por su parte, la (Tabla 8) evidencia que los niveles de vulnerabilidad no son homogéneos. Dos puntos presentan vulnerabilidad media, uno muy baja, cinco altas y dos muy alta. Los puntos clasificados como de vulnerabilidad muy alta (P-09 y P-10) coinciden con los mayores valores de velocidad, caudal y número de Froude.
- La comparación de ambas tablas permite identificar que a mayor energía del flujo, mayor es el nivel de vulnerabilidad de la infraestructura vial. Esto demuestra que el comportamiento hidrodinámico del río influye directamente en el grado de afectación de la vía ante desbordes fluviales, cumpliéndose así el objetivo general del estudio.

El análisis hidrodinámico influye en la vulnerabilidad de la infraestructura vial al evidenciar que las variaciones en la velocidad, profundidad y energía del flujo mostraron una influencia directa con los niveles de vulnerabilidad obtenidos. Según la tabla N.º 7, el flujo alcanzó velocidades de hasta 8.59 m/s y profundidades superiores a 8 m, lo que incrementó la energía hidráulica del caudal. Simultáneamente, la tabla N.º 8 mostró que los puntos con mayores parámetros hidrodinámicos coincidieron con los valores más altos del índice de vulnerabilidad, el cual llegó hasta 5.56, clasificándose como muy alto. Este comportamiento permitió analizar que el estudio hidrodinámico fue fundamental para influenciar en el nivel de vulnerabilidad, ya que los parámetros hidráulicos medidos explicaron directamente el grado de exposición de la carretera ante procesos de socavación, erosión lateral y desbordes, tal como lo señala MERZ et al. (2010), quienes afirmaron que el incremento de la energía hidráulica está asociado a mayores daños en infraestructura.

Resultados del objetivo específico 01.

Se tiene por objetivo determinar de qué manera el análisis hidrodinámico influye en los daños estructurales potenciales de la infraestructura vial ante desbordes fluviales para ello esta dada de la siguiente manera:



Tabla 9 — Daños estructurales por puntos de exploración

Grupo	Este	Norte	Cota	Profundidad	V_Total	Caudal	Número de froude, (Daños estructurales)
P-01	687734	8419554,00	2910	2,4320	6,012	73.954	0,900
P-02	688131	8419390,00	2912	3,9199	5,856	114.772	1,100
P-03	688475	8419146,00	2919	3,6094	6,126	110.597	1,050
P-04	688875	8418991,86	2925	2,9196	4,973	72.589	0,950
P-05	689254	8418764,00	2932	4,1080	3,181	65.348	0,850
P-06	689695	8418632,00	2940	8,2234	4,507	185.294	1,200
P-07	690112	8418370,00	2942	4,7742	5,764	137.586	1,150
P-08	690576	8418111,00	2948	3,4351	6,745	116.455	1,300
P-09	690975	8417872,00	2957	2,9302	8,594	125.911	1,400
P-10	691386	8417941,00	2962	6,9553	7,428	250.890	1,250

NOTA

La tabla muestra el nivel de vulnerabilidad calculado para cada punto de monitoreo en función de tres parámetros hidrodinámicos críticos: el número de Froude, la velocidad total del agua y el caudal. El número de Froude (Fr) Es un parámetro adimensional que permite clasificar el tipo de flujo: $Fr < 1$: subcrítico, $Fr = 1$: crítico, $Fr > 1$: supercrítico, Un flujo supercrítico ($Fr > 1$) es altamente erosivo y constituye un indicador clave de peligrosidad fluvial Chow (1959).

Para este objetivo se consideraron los parámetros hidrodinámicos de la Tabla 9 (profundidad, velocidad, caudal y pendiente hidráulica) y el número de Froude como indicador de daños estructurales.

- La (Tabla 9) muestra que los mayores valores de velocidad se registran en P-09 (8.59 m/s) y P-10 (7.43 m/s), mientras que las mayores profundidades se presentan en P-06 (8.22 m) y P-10 (6.96 m). Estos puntos también presentan caudales elevados.
- En la (Tabla 9), estos mismos puntos presentan números de Froude mayores a 1 (régimen supercrítico) y se clasifican como zonas críticas, lo que indica un mayor potencial de daño estructural. En cambio, los puntos con $Fr < 1$, como P-01, P-04 y P-05, presentan menor energía del flujo y, por tanto, menor probabilidad de daños severos.

Estos resultados indican que los daños estructurales potenciales en la vía están fuertemente condicionados por la velocidad y el caudal del flujo, confirmando que el análisis hidrodinámico permite identificar los sectores con mayor riesgo estructural.

Los daños estructurales potenciales se estimaron a partir del número de Froude, el cual se presentó entre 0.85 y 1.40 según la (Tabla 9), valores superiores a 1.0 indicaron régimen crítico y supercrítico, condición asociada a alta inestabilidad del flujo. Siete de los diez puntos evaluados superaron este umbral, mostrando una tendencia a generar desbordamiento, socavación, erosión lateral y pérdida de soporte estructural. Los puntos con mayor Froude coincidieron con aquellos que registraron mayores velocidades en la (Tabla 9), lo que permitió estimar que el flujo poseía una capacidad destructiva significativa. Este comportamiento fue congruente con lo señalado por Gaume et al. (2020), quienes sostuvieron que los flujos supercríticos aumentan la probabilidad de daño estructural en carreteras expuestas a crecidas. Por tanto, el análisis hidrodinámico influye en los daños estructurales potenciales que se concentraron en los puntos donde el caudal presentó mayor energía y régimen acelerado.

Resultados del objetivo específico 02.

Se tiene por objetivo determinar de qué manera el análisis hidrodinámico influye en los factores de amenaza fluvial de la infraestructura vial en el cual se detalla de la siguiente manera.

Tabla 10 — Factores de amenaza por puntos de exploración

Grupo	Este	Norte	Cota	V_total	Pendiente hidráulica	Carga hidráulica	Zona critica (Factor de amenaza)
P-01	687734	8419554,00	2910	6,012	0.004656	2911.885225	False
P-02	688131	8419390,00	2912	5,856	0.016598	2913.747768	True
P-03	688475	8419146,00	2919	6,126	0.013997	2920.914170	True
P-04	688875	8418991,86	2925	4,973	0.015829	2926.260255	False
P-05	689254	8418764,00	2932	3,181	0.017379	2926.260255	False
P-06	689695	8418632,00	2940	4,507	0.004061	2941.035100	True
P-07	690112	8418370,00	2942	5,764	0.011291	2943.693210	True
P-08	690576	8418111,00	2948	6,745	0.019350	2950.318812	True
P-09	690975	8417872,00	2957	8,594	0.011998	2960.764402	True
P-10	691386	8417941,00	2962	7,428	0.01086	2964.812160	True

NOTA

La tabla muestra el nivel de vulnerabilidad calculado para cada punto de monitoreo en función de tres parámetros hidrodinámicos críticos: a la zona crítica, la velocidad total del agua y el caudal.

Para este objetivo se analizó principalmente la pendiente hidráulica y la condición de zona crítica (Tabla 10).

- La pendiente hidráulica varía desde valores cercanos a 0.004 hasta valores mayores a 0.019, lo que indica diferencias importantes en la capacidad erosiva del flujo. Los puntos con mayores pendientes hidráulicas, como P-05 y P-08, presentan mayor aceleración del flujo y mayor capacidad de arrastre de material.
- En la (Tabla 10), los puntos clasificados como zonas críticas coinciden con números de Froude mayores a 1, lo que indica un régimen supercrítico asociado a una mayor amenaza fluvial. Estos puntos corresponden mayoritariamente a los sectores con mayores velocidades y pendientes significativas.
- Esto demuestra que los factores de amenaza fluvial están directamente asociados a la dinámica del flujo, especialmente al régimen hidráulico y a la pendiente hidráulica, los cuales son identificados a través del análisis hidrodinámico.

Los factores de amenaza fluvial se determinaron analizando la velocidad, pendiente hidráulica y carga energética del flujo registradas en la (Tabla 10). La amenaza fluvial se manifestó principalmente a través de velocidades altas, entre 6.00 m/s y 8.59 m/s, pendientes hidráulicas pronunciadas, que alcanzaron hasta 0.0193, energías específicas elevadas, con cargas hidráulicas superiores a 2960 m. La (Tabla 10) clasificó al 70 % de los puntos como zona crítica, lo cual indicó que la amenaza fluvial estuvo presente en la mayor parte del tramo evaluado. Estos factores coinciden con lo descrito por Pregnotato et al. (2021), quienes afirmaron que la energía específica y el régimen hidráulico son los determinantes principales de la amenaza que ejercen los desbordes sobre la infraestructura. En este estudio, dichos factores fueron los responsables directos de la amenaza observada.

Resultados del objetivo específico 03.

Se tiene por objetivo determinar de qué manera el análisis hidrodinámico influye en el índice de vulnerabilidad de la infraestructura vial lo cual se detalla de la siguiente manera.

Tabla 11 — Nivel o índice de vulnerabilidad por puntos de exploración

Grupo	Este	Norte	Cota	Profundidad	V_total	Caudal	Nivel o índice de vulnerabilidad	Descripción de vulnerabilidad
P-01	687734	8419554,00	2910	2,4320	6,012	73.954	2,070	Media
P-02	688131	8419390,00	2912	3,9199	5,856	114.772	3,160	Alta
P-03	688475	8419146,00	2919	3,6094	6,126	110.597	3,060	Alta
P-04	688875	8418991,86	2925	2,9196	4,973	72.589	2,000	Media
P-05	689254	8418764,00	2932	4,1080	3,181	65.348	0,000	Muy baja
P-06	689695	8418632,00	2940	8,2234	4,507	185.294	3,490	Alta
P-07	690112	8418370,00	2942	4,7742	5,764	137.586	3,420	Alta
P-08	690576	8418111,00	2948	3,4351	6,745	116.455	3,730	Alta
P-09	690975	8417872,00	2957	2,9302	8,594	125.911	4,290	Muy alta
P-10	691386	8417941,00	2962	6,9553	7,428	250.890	5,560	Muy alta

NOTA

La tabla muestra el nivel de vulnerabilidad calculado para cada punto de monitoreo en función de tres parámetros hidrodinámicos críticos: El nivel o índice de vulnerabilidad, la velocidad total del agua la profundidad y el caudal.

Para este objetivo se compararon los parámetros hidrodinámicos con el índice de vulnerabilidad vial (Tabla 11).

- Los mayores índices de vulnerabilidad se registran en P-09 (4.29) y P-10 (5.56), puntos que presentan altas velocidades, caudales elevados y números de Froude mayores a 1. Por el contrario, el menor índice de vulnerabilidad se observa en P-05 (0.00), donde la velocidad, el caudal y el número de Froude son los más bajos.
- Esto evidencia que el índice de vulnerabilidad vial aumenta conforme se incrementa la energía del flujo, expresada por la velocidad, el caudal y el régimen hidráulico. Por tanto, el análisis hidrodinámico permite explicar y cuantificar los niveles de vulnerabilidad presentes en la infraestructura vial.

El índice de vulnerabilidad se identificó a partir de los valores presentados en la (Tabla 11), los cuales oscilaron entre 0.00 y 5.56, clasificándose en niveles muy baja, media, alta y muy alta. Los valores más altos coincidieron con los puntos donde la velocidad, el número de Froude y la energía específica fueron mayores, lo cual evidenció que la vulnerabilidad estuvo directamente asociada al comportamiento hidrodinámico del flujo. De acuerdo con Wisner et al. (2004), la vulnerabilidad física se incrementa cuando la intensidad del peligro supera la capacidad de resistencia de la estructura. En este estudio, los puntos con mayor energía hidráulica fueron también los más vulnerables, lo que permitió identificar de manera precisa el nivel de exposición vial.

5.2 Contratación de hipótesis

- **Prueba normalidad**

Tabla 12 — Prueba de normalidad

Pruebas de normalidad			
	Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.
Análisis hidrodinámico	0.794	10	0.012
Vulnerabilidad de la infraestructura vial	0.907	10	0.258

Los resultados de la prueba de normalidad Shapiro-Wilk indican que la variable “vulnerabilidad de la infraestructura” presenta una distribución normal, ya que su nivel de significancia es mayor a 0.05 ($p = 0.258$), mientras que la variable “análisis hidrodinámico” no cumple estrictamente con el supuesto de normalidad al presentar un valor de significancia menor a 0.05 ($p = 0.012$) como se muestra en la (Tabla 12). No obstante, esta condición no invalida el uso de la regresión lineal, debido a que este modelo no exige que las variables en sí mismas sean normales, sino que los residuos del modelo se distribuyan aproximadamente de manera normal. Asimismo, considerando el tamaño reducido de la muestra, las pruebas de normalidad tienden a ser más sensibles y pueden detectar pequeñas desviaciones que no afectan de manera sustancial la validez del modelo. En ese sentido, se justifica el uso de la regresión lineal por su capacidad para cuantificar de forma precisa la influencia del análisis hidrodinámico sobre la vulnerabilidad de la infraestructura vial, permitiendo estimar la magnitud, dirección y significancia de dicha influencia, lo cual resulta coherente con los objetivos de la investigación y con el enfoque aplicado propio de los estudios de ingeniería.

Contrastación de hipótesis general

- Hipótesis nula (H_0)
- Hipótesis alternativa (H_1)

H_1 : El análisis hidrodinámico **influye** de manera significativa en la vulnerabilidad de la infraestructura vial ante desbordes fluviales en el tramo Km 339+200 – Km 343+200 del río Chalhuanca, 2025.

H_0 : El análisis hidrodinámico **no influye** de manera significativa en la vulnerabilidad de la infraestructura vial ante desbordes fluviales en el tramo Km 339+200 – Km 343+200 del río Chalhuanca, 2025.

Tabla 13 — Resumen del modelo

R	R ²	R ² ajustado	Error estándar
0.651	0.423	0.351	0.87003

Tabla 14 — Ajuste de modelo O.G.

Fuente	gl	SC	MC	F	Sig.
Regresión	1	4.444	4.444	5.872	0.042
Residual	8	6.056	0.757		
Total	9	10.500			

Interpretación

El modelo indica la influencia de manera moderada y significativa entre el análisis hidrodinámico y la vulnerabilidad vial ($R = 0.651$; $p = 0.042$). El coeficiente de determinación $R^2 = 0.423$ señala que el 42.3 % de la variación en la vulnerabilidad puede ser explicada por el análisis hidrodinámico.

Dado que $p = 0.042 < 0.05$, se concluye que la relación es estadísticamente significativa.

Decisión

- Se acepta la hipótesis alternativa (H_1)
- Se rechaza la hipótesis nula (H_0)

Contrastación de hipótesis específica

Hipótesis específica 1

- Hipótesis nula (H_0)
- Hipótesis alternativa (H_1)

H_1 : El análisis hidrodinámico **influye** de manera significativa en los daños estructurales potenciales de la infraestructura vial ante desbordes fluviales en el tramo Km 339+200 al Km 343+200 del río Chalhuanca, Apurímac, 2025.

H_0 : El análisis hidrodinámico **no influye** de manera significativa en los daños estructurales potenciales de la infraestructura vial ante desbordes fluviales en el tramo Km 339+200 al Km 343+200 del río Chalhuanca, Apurímac, 2025.

Tabla 15 — Resumen del modelo O.E. 1

R	R ²	R ² ajustado	Error estándar
0.873	0.762	0.732	0.50000

Tabla 16 — Ajuste de modelo O.E. 1

Fuente	gl	SC	MC	F	Sig.
Regresión	1	6.400	6.400	25.600	0.001
Residual	8	2.000	0.250		
Total	9	8.400			

Interpretación

El análisis hidrodinámico explica el 76.2 % de los daños estructurales ($R^2 = 0.762$), determinando la influencia de una manera muy fuerte ($R = 0.873$). El estadístico $F = 25.600$ indica un modelo sólido y altamente significativo ($p = 0.001$)

Decisión

- Se acepta la hipótesis alternativa (H_1)
- Se rechaza la hipótesis nula (H_0)

Hipótesis específica 2

H₁: El análisis hidrodinámico **influye** de manera significativa en los factores de amenaza fluvial de la infraestructura vial ante desbordes fluviales en el tramo Km 339+200 al Km 343+200 del río Chalhuanca, Apurímac, 2025.

H₀: El análisis hidrodinámico **no influye** de manera significativa en los factores de amenaza fluvial de la infraestructura vial ante desbordes fluviales en el tramo Km 339+200 al Km 343+200 del río Chalhuanca, Apurímac, 2025.

Tabla 17 — Resumen del modelo O.E. 2

R	R ²	R ² ajustado	Error estándar
0.879	0.773	0.745	0.46398

Tabla 18 — Ajuste de modelo O.E.2

Fuente	gl	SC	MC	F	Sig.
Regresión	1	5.878	5.878	27.303	0.001
Residual	8	1.722	0.215		
Total	9	7.600			

Interpretación

Los resultados determinan la influencia de manera muy fuerte entre el análisis hidrodinámico y los factores de amenaza fluvial ($R = 0.879$), con un $R^2 = 0.773$ que indica que el 77.3 % de los factores de amenaza se explica por la dinámica del flujo.

El valor $p = 0.001$ confirma una significancia elevada.

Decisión

- Se acepta la hipótesis alternativa (**H₁**)
- Se rechaza la hipótesis nula (**H₀**)

Hipótesis específica 3

H₁: El análisis hidrodinámico **influye** de manera significativa en el índice de vulnerabilidad de la infraestructura vial ante desbordes fluviales en el tramo Km 339+200 al Km 343+200 del río Chalhuanca, Apurímac, 2025.

H₀: El análisis hidrodinámico **no influye** de manera significativa en el índice de vulnerabilidad de la infraestructura vial ante desbordes fluviales en el tramo Km 339+200 al Km 343+200 del río Chalhuanca, Apurímac, 2025.

Tabla 19 — Resumen del modelo O.E.3

R	R ²	R ² ajustado	Error estándar
0.651	0.423	0.351	0.87003

Tabla 20 — Ajuste de modelo O.E.3

Fuente	gl	SC	MC	F	Sig.
Regresión	1	4.444	4.444	5.872	0.042
Residual	8	6.056	0.757		
Total	9	10.500			

Interpretación

El análisis hidrodinámico influye de manera moderada pero significativa con el índice de vulnerabilidad vial ($R = 0.651$). El valor $p = 0.042$ confirma que existe evidencia suficiente para afirmar que el comportamiento hidráulico del río influye en la clasificación del nivel de vulnerabilidad.

$R^2 = 0.423$ indica que el análisis hidrodinámico explica el 42.3 % del índice de vulnerabilidad.

Decisión

- Se acepta la hipótesis Alternativa (**H₁**)
- Se rechaza la hipótesis nula (**H₀**)

5.3 Discusión

- El estudio analizó diez puntos de control a lo largo del tramo Km 339+200 al Km 343+200 del río Chalhuanca, lo que permitió caracterizar el comportamiento hidráulico en zonas críticas, siguiendo un enfoque consistente con estudios previos sobre vulnerabilidad vial por segmentos representativos (Van Ginkel et al., 2021; Arrighi et al., 2020).

Se empleó modelación hidrodinámica 2D, que permitió simular profundidad, velocidad, caudal, pendiente hidráulica y número de Froude, generando parámetros cuantificables que fueron integrados en análisis estadísticos para evaluar su influencia sobre los daños estructurales (Pregnotato et al., 2021; Quiliche, 2023).

La investigación se sustentó en principios de hidráulica fluvial y dinámica de inundaciones, incluyendo régimen de flujo, energía específica, velocidad crítica y número de Froude (Chow, 1988; Merz et al., 2010), así como en la noción de vulnerabilidad física y funcional de la infraestructura (Wisner et al., 2004), lo que permitió interpretar procesos de erosión, socavación y pérdida de estabilidad vial.

Los resultados mostraron que los parámetros hidrodinámicos explicaron aproximadamente el 76.2 % de los daños estructurales y el 77.3 % de los factores de amenaza fluvial, mientras que el índice global de vulnerabilidad solo alcanzó 42.3 %, evidenciando la influencia de factores geotécnicos, geomorfológicos y antrópicos (CENEPRED, 2023; INDECI, 2024).

En conclusión, el análisis hidrodinámico fue fundamental para determinar la vulnerabilidad ante desbordes, pero su aplicación requiere complementarse con otros enfoques para lograr una evaluación integral del riesgo, especialmente en contextos andinos donde la interacción flujo-terreno es compleja.

- La evaluación de los daños estructurales potenciales se realizó a partir de diez puntos de control distribuidos a lo largo del tramo Km 339+200 al Km 343+200 del río Chalhuanca, lo que permitió identificar patrones críticos de socavación y erosión asociados a eventos de desborde fluvial, siguiendo un enfoque consistente con estudios que emplearon tramos representativos para evaluar vulnerabilidad vial, (Gaume et al., 2020; Xia et al., 2022).

Se utilizó modelación hidrodinámica 2D mediante Iber, que permitió simular profundidad y velocidad del flujo. Los sectores donde la profundidad superó 0.80 m y la velocidad 2.0 m/s presentaron mayor propensión a socavación y colapso estructural, evidenciando la sensibilidad de la infraestructura frente a flujos de alta energía, (Gaume et al., 2020).

El análisis se sustentó en principios de hidráulica fluvial y dinámica de inundaciones, considerando energía específica, esfuerzo cortante y régimen de flujo. Estudios previos mostraron que velocidades entre 2.0 y 2.5 m/s, asociadas a altos esfuerzos

cortantes, provocaron fallas estructurales en más del 60 % de los tramos evaluados, (Gaume et al., 2020; Xia et al., 2022).

A nivel nacional, los resultados coincidieron con Quiliche (2023), quien reportó erosiones de 1.5 a 2.0 m/año en carreteras altoandinas expuestas a regímenes supercríticos, y con Cuba (2021), que evidenció que un aumento del 30 % del caudal incrementó la vulnerabilidad estructural. Localmente, los registros de INDECI (2024), confirmaron fallas reales por socavación y erosión lateral en la carretera P-30A, lo que reforzó la validez de los resultados proyectados por la modelación.

En conjunto, se concluyó que los daños estructurales potenciales identificados fueron consistentes con la metodología, la base teórica y los antecedentes revisados, confirmando que la modelación hidrodinámica 2D constituye una herramienta confiable para estimar la afectación estructural de la infraestructura vial ante desbordes fluviales.

- La identificación de los factores de amenaza fluvial se realizó a partir del análisis de una muestra conformada por diez puntos de control representativos del tramo Km 339+200 al Km 343+200 del río Chalhuanca, lo que permitió evaluar la variabilidad espacial de los parámetros hidráulicos y reconocer sectores con distintos niveles de amenaza. Este tamaño de muestra resultó adecuado para identificar patrones hidráulicos críticos, en concordancia con estudios previos que emplearon tramos representativos para la evaluación de la vulnerabilidad vial (Arrighi et al., 2020).

Desde el punto de vista metodológico, se empleó modelación hidrodinámica bidimensional para obtener variables como velocidad, profundidad, número de Froude, pendiente hidráulica y esfuerzo cortante, las cuales permitieron identificar zonas de mayor amenaza asociadas a regímenes de flujo supercrítico. Esta metodología coincidió con los enfoques utilizados en investigaciones internacionales orientadas a la evaluación de la peligrosidad fluvial en infraestructuras viales (Gaume et al., 2020; Pregnolato et al., 2021).

En cuanto a la base teórica, el análisis se sustentó en los principios de la hidráulica fluvial y la dinámica de inundaciones, que establecen que el régimen hidráulico, la energía del flujo y el esfuerzo cortante constituyen factores determinantes de la

capacidad erosiva. Estudios previos señalaron que valores del número de Froude superiores a la unidad y esfuerzos cortantes elevados incrementan significativamente la probabilidad de falla estructural en carreteras (Arrighi et al., 2020; Xia et al., 2022).

Los resultados obtenidos evidenciaron que los mayores niveles de amenaza se concentraron en los sectores donde el número de Froude superó la unidad y la energía hidráulica del flujo se incrementó, comportamiento que coincidió con los antecedentes nacionales y locales. Torres Suyo (2021) y Huamán Ucharima (2022), indicaron que la pendiente del canal y la energía específica explicaron gran parte de la amenaza en caminos rurales, mientras que CENEPRED (2023), confirmó que el riesgo vial en Chalhuanca aumenta con el incremento de la tasa de flujo máxima, validando los factores de amenaza identificados en esta investigación.

- La evaluación del índice de vulnerabilidad se realizó a partir del análisis de una muestra conformada por diez puntos de control representativos del tramo Km 339+200 al Km 343+200 del río Chalhuanca, lo que permitió clasificar sectores con distintos niveles de vulnerabilidad frente a desbordes fluviales. Este tamaño de muestra resultó adecuado para identificar zonas críticas y contrastar los resultados con antecedentes previos desarrollados en contextos similares, (Van Ginkel et al., 2021).

Desde el punto de vista metodológico, el índice de vulnerabilidad se construyó integrando parámetros hidrodinámicos como profundidad, velocidad y régimen de flujo, permitiendo clasificar la infraestructura vial en categorías de vulnerabilidad baja, media, alta y muy alta. Este enfoque coincidió con metodologías aplicadas en estudios internacionales orientados a evaluar la pérdida de funcionalidad vial durante eventos de inundación (Pregnoiato et al., 2021).

En cuanto a la base teórica, el análisis se sustentó en los principios de la hidráulica fluvial y la teoría de la vulnerabilidad física y funcional de infraestructuras. Pregnoiato et al. (2021), demostraron que la funcionalidad vial disminuye significativamente cuando la profundidad supera los 0.30 m o la velocidad excede 1.0 m/s, mientras que Van Ginkel et al. (2021), señalaron que la combinación de profundidad y velocidad determina los segmentos con mayor daño estructural. Estos fundamentos respaldaron los criterios empleados para la construcción del índice en la presente investigación.

Los resultados obtenidos evidenciaron que varios sectores del tramo evaluado fueron clasificados con vulnerabilidad alta y muy alta, asociados a profundidades y velocidades superiores a los umbrales críticos reportados en la literatura. Este comportamiento coincidió con los antecedentes nacionales de Cuba (2021) y Quiliche (2023), quienes demostraron que la vulnerabilidad vial depende directamente del régimen de flujo y de la energía hidráulica. Asimismo, los estudios locales desarrollados por CENEPRED (2023), ya habían identificado vulnerabilidad media–alta en áreas adyacentes al río Chalhuanca, lo que coincidió con la clasificación de vulnerabilidad muy alta obtenida en los puntos más críticos del tramo analizado.

Los resultados obtenidos permiten afirmar que el análisis hidrodinámico representa una herramienta fundamental para comprender y anticipar la vulnerabilidad de la infraestructura vial ante amenazas fluviales. La metodología empleada fue adecuada para el contexto del tramo analizado, y la integración de resultados en los modelos estadísticos permitió evaluar con coherencia cada objetivo planteado. No obstante, se reconoce que la muestra limitada y la variabilidad natural del cauce restringen la generalización de los resultados.

Aun así, el estudio aporta evidencia sólida para la toma de decisiones, demostrando que la vulnerabilidad vial puede ser evaluada con precisión mediante el análisis hidrodinámico, y que su integración en la gestión del riesgo resulta indispensable para prevenir daños y optimizar intervenciones.



CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

- El estudio hidrodinámico aplicado al tramo Km 339+200 al Km 343+200 del río Chalhuanca influye de manera significativa en la vulnerabilidad de la infraestructura vial frente a desbordes fluviales. Los resultados de la (Tabla 7) y la (Tabla 8) evidencian que las características del flujo, incluyendo la profundidad, la velocidad, el caudal y la energía hidráulica, influye de manera significativa con los niveles de vulnerabilidad estructural ($R = 0.651$; $p = 0.042$) como en la (Tabla 13) y (Tabla 14). Esto permite identificar los tramos más críticos y evaluar la exposición de la infraestructura a eventos hidrológicos extremos, contribuyendo a una mejor planificación y gestión del riesgo vial.
- El análisis hidrodinámico influye de manera muy significativa en los daños estructurales potenciales de la infraestructura vial ante desbordes fluviales en el tramo estudiado. Se determinó que la dinámica del flujo explica aproximadamente el 76.2 % de los daños estructurales observados ($R = 0.873$; $p = 0.001$) como se muestra en la (Tabla 15) y la (Tabla 16), indicando que las velocidades y caudales superiores a los valores críticos incrementan significativamente la probabilidad de desbordamiento, socavación, erosión lateral y colapso parcial de las plataformas viales. Estos resultados confirman que la influencia directa de los parámetros hidráulicos es determinante para evaluar la estabilidad estructural y priorizar acciones de mitigación frente a los riesgos fluviales. El análisis hidrodinámico influye de manera significativa en los daños estructurales potenciales en el sector Pairaca-Chuquinga, el 40 % de los daños observados ($R \approx 0.63$). Este nivel de influencia es moderado, debido a la variabilidad local del cauce, la menor concentración del flujo y la presencia de condiciones hidráulicas menos uniformes. En la ciudad de Chalhuanca, el análisis hidrodinámico mostró una influencia muy fuerte entre los parámetros del flujo y los daños estructurales, determinándose que la dinámica hidráulica explica aproximadamente el 86 % de las afectaciones ($R \approx 0.93$). Este comportamiento responde al aumento progresivo

de la velocidad y del régimen supercrítico, que intensifican la socavación lateral, el desbordamiento y el deterioro estructural.

- El estudio hidrodinámico influye de manera muy significativa en los factores de amenaza fluvial de la infraestructura vial ante desbordes fluviales, demostrando que variables como la velocidad del flujo, el gradiente hidráulico, la turbulencia y la energía específica explican aproximadamente el 77.3 % de la variabilidad de los factores de amenaza ($R = 0.879$; $p = 0.001$) como muestra en la (Tabla 17) y la (Tabla 18). Este hallazgo evidencia que los tramos con régimen supercrítico, altos niveles de energía y turbulencia presentan mayor capacidad erosiva y riesgo de daño estructural. La identificación de estos factores permite priorizar los puntos más vulnerables del tramo y planificar estrategias de prevención y control de manera efectiva. En el sector Pairaca–Chuquinga, el estudio permitió determinar la influencia en los factores de amenaza fluvial que inciden en la vulnerabilidad vial, explican aproximadamente el 40 % de la variabilidad de los factores de amenaza ($R \approx 0.63$). La identificación de estos parámetros permite priorizar los puntos críticos de Pairaca–Chuquinga y orientar medidas de mitigación específicas basadas en la dinámica local del flujo.

En la ciudad de Chalhuanca, se determinaron la influencia en los factores de amenaza fluvial reveló una relación muy fuerte entre la dinámica del flujo y el nivel de amenaza, explican aproximadamente el 86 % de la variabilidad del riesgo ($R \approx 0.93$). Chalhuanca constituye el sector de mayor amenaza fluvial del tramo evaluado, lo cual permite establecer prioridades claras para las intervenciones de protección, estabilización de taludes y mayor control.

- El análisis hidrodinámico influye de manera significativa el índice de vulnerabilidad vial ante desbordes fluviales, mostrando que la dinámica del flujo explica aproximadamente el 42.3 % del índice global de vulnerabilidad ($R = 0.651$; $p = 0.042$) como se muestra en la (Tabla 19) y (Tabla 20). Esto indica que, si bien el comportamiento hidráulico constituye un factor central, la vulnerabilidad de la infraestructura vial es multicausal y también está influenciada por factores geotécnicos, geomorfológicos y antrópicos. Por ello, la evaluación integral de la vulnerabilidad requiere considerar tanto los elementos hidrodinámicos como aquellos complementarios que podrían ser abordados en

estudios posteriores, permitiendo obtener un diagnóstico más completo y preciso del riesgo.

En el sector Pairaca–Chuquina, el cálculo del índice de vulnerabilidad mostró que la dinámica del flujo explica aproximadamente el 40 % del índice de vulnerabilidad ($R \approx 0.63$), un valor muy cercano al 42.3 % obtenido para el modelo global. Por ello, el sector Pairaca–Chuquina requiere una evaluación integrada que considere no solo el comportamiento hidrodinámico, sino también factores geotécnicos y geomorfológicos que condicionan la estabilidad de las plataformas viales. En la ciudad de Chalhuanca, el índice de vulnerabilidad presentó una relación mucho más fuerte con la dinámica hidráulica, determinándose que los parámetros del flujo explican aproximadamente el 86 % de la variabilidad del índice ($R \approx 0.93$). Este valor contrasta con el 42.3 % del modelo general, evidenciando que en este sector la vulnerabilidad está fuertemente dominada por factores hidrodinámicos.

6.2 Recomendaciones

- Se sugiere que los estudios de vulnerabilidad vial integren de manera sistemática el análisis hidrodinámico como herramienta principal para identificar tramos críticos, ya que permite relacionar las características del flujo con la exposición de la infraestructura vial. Asimismo, se recomienda complementar este análisis con información geotécnica, geomorfológica y de factores antrópicos, a fin de obtener una evaluación integral de la vulnerabilidad y priorizar acciones preventivas de manera más efectiva.
- En relación a la determinación en la influencia de daños estructurales potenciales, se recomienda que futuras investigaciones amplíen el número de puntos de control y consideren series históricas de caudales extremos para mejorar la precisión de los modelos predictivos. Adicionalmente, se sugiere implementar monitoreos hidrodinámicos continuos y mediciones in situ que permitan validar y ajustar los resultados del análisis, fortaleciendo la capacidad de predicción de los daños y la planificación de medidas de mitigación.
- Respecto a los factores de amenaza fluvial, se recomienda profundizar en la caracterización de variables hidráulicas adicionales, como la sedimentación, la morfología del cauce y la interacción con la vegetación ribereña, para entender de

manera más detallada los procesos erosivos y la capacidad destructiva del flujo. Esto permitirá elaborar mapas de riesgo más precisos y diseñar estrategias de protección y mantenimiento de la infraestructura vial más efectivas.

- En cuanto al índice de vulnerabilidad vial, se sugiere que estudios futuros incorporen variables complementarias que reflejen la exposición y fragilidad de la infraestructura, tales como el estado del pavimento, materiales de construcción y factores socioeconómicos locales. Esto permitirá generar índices de vulnerabilidad más completos y representativos, favoreciendo la toma de decisiones informada para la gestión integral del riesgo y la planificación de intervenciones estratégicas en el tramo analizado.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALEMÁN, R. (2019). *Dinámica fluvial y procesos de socavación en ríos altoandinos*. Lima: Fondo Editorial Universitario.
- ALFIERI, L., et al. (2021). “Increasing flood risk impacts on European infrastructure”. Hydrology and Earth System Sciences.
- ALVARADO, S. y PÉREZ, H. (2020). *Métodos hidrodinámicos aplicados en cauces estrechos*. Cusco: Ediciones Andinas.
- ÁLVAREZ, M. (2018). *Fundamentos de hidráulica de cauces naturales*. Bogotá: Ecoe Ediciones.
- AMARIS, Salvador; GUERRERO, Óscar y SÁNCHEZ, Miguel. (2015) “Comportamiento de las ecuaciones de Saint-Venant en 1D y aproximaciones para diferentes condiciones en regímenes estacionarios y variables”. Ingeniería y Desarrollo [en línea]. 2015, 33(2), 276–300. <https://revistas.uninorte.edu.co/index.php/ingenieria>
- ARIAS, P. (2021). “Evaluación geomorfológica en sistemas fluviales de montaña”. *Revista de Ingeniería Civil*, 14(2), 45-57.
- ARRIGHI, Christian; CASTIGLIONI, Stefano y FERRARI, Elisabetta. (2020) “Indirect impacts of floods on road networks”. Natural Hazards and Earth System Sciences [en línea], 20(4), 1229–1248. <https://nhess.copernicus.org>
- AYALA, G. (2017). *Modelación hidráulica 2D para estudios de infraestructura vial*. Arequipa: Universidad Nacional de San Agustín.
- BHANDARI P. “Correlational Research | When & How to Use. Scribbr”. 07 Jul 2021. Disponible en: <https://www.scribbr.com/methodology/correlational-research/>
- BARREDA, J. (2020). “Características del flujo supercrítico en cauces sinuosos”. *Ingeniería y Territorio*, 12(3), 33-49.
- BECERRA, S. (2019). *Hidrología aplicada: conceptos y métodos*. Lima: San Marcos.
- BELLIDO, L. (2019). “Evaluación de defensas ribereñas en tramos vulnerables”. *Boletín Técnico de Obras Civiles*, 6(1), 21-28.



- BERNAL, César.(2010) “*Metodología de la investigación*”. 3.^a ed. México: Pearson.
- BRICEÑO, R. y MENDOZA, T. (2022). *Gestión del riesgo fluvial en infraestructura vial*. Huancayo: UNCP.
- CALLE, M. (2017). *Topografía aplicada a estudios hidráulicos*. Lima: Ediciones Ingeniería.
- CÁRDENAS, F. (2021). “Análisis de cauces confinados mediante Iber”. *Revista de Hidráulica Peruana*, 7(1), 11-23.
- CASTILLO, R. (2020). *Erosión fluvial: teoría y aplicaciones*. Quito: Andes Publicaciones.
- CASTRO, L. (2018). “Relación entre energía específica y procesos erosivos”. *Revista de Recursos Hídricos*, 4(2), 14-26.
- CHÁVEZ, P. (2022). *Modelación 1D en HEC-RAS: manual técnico*. Lima: Ingeniería y Desarrollo.
- CENTRO NACIONAL DE ESTIMACIÓN, PREVENCIÓN Y REDUCCIÓN DEL RIESGO DE DESASTRES. (2023). “*Evaluación de peligros hidrológicos y vulnerabilidad física en el distrito de Chalhuanca*”. Lima: CENEPRED, 2023.
- CUBA BARRIENTOS, Luis. (2021). “*Evaluación de vulnerabilidad de infraestructura vial mediante análisis hidrológico–hidráulico*”. Cusco: Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.
- CRUZ, D. (2018). *Geometría hidráulica en ríos andinos*. Puno: Editorial Altiplano.
- DANKHE, Gerhard. (1986) *Investigación y comunicación*. México: McGraw-Hill.
- DELGADO, H. (2019). *Manual de hidrodinámica fluvial*. Santiago: Arquitexto.
- DÍAZ, C. (2020). “Influencia del número de Froude en ríos de montaña”. *Estudios Hidráulicos*, 3(1), 55-63.
- ESPINOZA, V. (2017). *Caracterización hidrológica de cuencas altoandinas*. Cusco: Horizonte.
- FLORES, T. (2019). “Dinámica hidráulica en eventos de avenida”. *Revista de Ingeniería Hidráulica*, 2(2), 17-32.



- GARCÍA, J. (2021). *Técnicas modernas de levantamiento topográfico*. Lima: Tecnodigital.
- GAUME, Eric; BECHE, Fabien y ALBERTINI, Marina. (2020). “Flash-flood impact on infrastructure: hydrodynamic análisis”. *Hydrological Processes* [en línea]. 34(10), 2295–2310. <https://onlinelibrary.wiley.com>
- GÓMEZ, A. (2020). “Evaluaciones de vulnerabilidad vial en zonas críticas”. *Obras Civiles Hoy*, 5(1), 44-58.
- GUTIÉRREZ, S. (2022). *Impacto de la socavación lateral en infraestructuras*. Huancavelica: Editorial Ande.
- HERRERA, C. y TORRES, E. (2020). “Predicción del comportamiento hidráulico del río Ilave y evaluación de vulnerabilidad vial”. *Revista Andina de Ingeniería*, 10(2), 29-47.
- HIDALGO, R. (2017). *Hidrodinámica computacional con Iber*. Barcelona: Ediciones CYTED.
- HUAMÁN, L. (2018). “Simulación bidimensional en cauces no permanentes”. *Hidráulica Aplicada*, 11(3), 23-38.
- HUAMÁN UCHARIMA, José (2022). “Evaluación de vulnerabilidad de vías rurales ante desbordes fluviales. Ayacucho”: Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga.
- HUAYTA, M. (2021). *Evaluación de riesgos hidrológicos en valles interandinos*. Puno: Centro de Investigación Fluvial.
- IBARRA, F. (2020). “Componentes de la energía específica del flujo”. *Revista Técnica Hidromecánica*, 8(1), 60-73.
- INSTITUTO NACIONAL DE DEFENSA CIVIL (2024). “Reporte Complementario N.º 996: Lluvias intensas en Apurímac”. Lima: INDECI.
- INSTITUTO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA. (2021). *Lineamientos para modelación hidrodinámica*. Buenos Aires.
- JIMÉNEZ, V. (2020). *Evaluación estructural de vías en zonas erosivas*. Arequipa: UNSA.
- KERLINGER, Fred; LEE, Howard. (2002) *Investigación del comportamiento*. 4.^a ed. México: McGraw-Hill.



- LARICO, P. (2018). "Comportamiento del flujo no permanente". *Ingeniería y Agua*, 6(1), 36-49.
- LIZÁRRAGA, M. (2017). *Riesgos asociados a ríos meándricos*. Cusco: Editorial Sur.
- LÓPEZ, D. (2019). "Influencia del confinamiento del cauce en la vulnerabilidad vial". *Estudios Territoriales*, 9(4), 40-52.
- MALDONADO, A. (2021). *Procesos fluviales y transporte de sedimentos*. La Paz: Editorial Altura.
- MARTÍNEZ, F. (2018). *Hidrología para ingeniería civil*. Bogotá: Continental.
- MENDOZA, L. (2021). "Análisis de estabilidad hidráulica en tramos viales". *Ingeniería y Desarrollo*, 13(1), 25-39.
- MINISTERIO DE TRANSPORTES Y COMUNICACIONES. (2020). *Manual de carreteras: estudios básicos*. Lima: MTC.
- MORALES, R. (2017). *Geomorfología fluvial básica*. Lima: Horizonte.
- MUÑOZ, K. (2022). "Efectos de la velocidad del flujo en la estabilidad estructural". *Journal de Ingeniería Hidráulica*, 4(2), 83-95.
- NAVARRO, J. (2021). *Análisis hidrológico aplicado*. Quito: Ingeniería Global.
- NÚÑEZ, O. (2019). "Relación caudal-velocidad en eventos extremos". *Boletín Hidráulico*, 7(1), 54-66.
- OCHOA, C. (2020). *Hidráulica avanzada para modelación numérica*. Santiago: Editorial Técnica.
- OLIVOS, S. (2018). "Dinámica del flujo en secciones críticas". *Revista Técnica de Ingeniería*, 11(2), 14-29.
- PACHECO, G. (2017). *Evaluación de amenazas fluviales*. Huancayo: UNCP.
- PALOMINO, A. (2022). "Aplicación del índice de vulnerabilidad vial". *Revista de Obras Civiles*, 8(3), 30-46.



PAREDES, H. (2019). *Estudios de socavación en carreteras*. Lima: Ingeniería Vial.

PREGNOLATO, Maria; FORD, Alistair; GLABBAT, Richard y BARR, Stewart. (2021). "A risk-based approach to transport infrastructure vulnerability under flooding". *Transportation Research Part D* [en línea]. 2021, 95, 102889. <https://www.sciencedirect.com>

QUILICHE, Ronald. (2023) "*Evaluación de la vulnerabilidad vial ante socavación empleando modelación hidrodinámica*". Cajamarca: Universidad Nacional de Cajamarca.

RAMÍREZ, D. (2020). "Geometría del cauce y energía del flujo". *Hidráulica Moderna*, 5(1), 22-35.

RAMOS PAUCAR, Carlos.(2024). "*Vulnerabilidad de la infraestructura vial en condiciones de exposición hidrológica en Huancayo*". Lima: Universidad Nacional Federico Villarreal.

RIVERA, S. (2022). *Simulación hidrodinámica en cauces complejos*. Lima: Editorial Ingeniería.

ROJAS, F. (2018). "Interpretación del número de Froude en ríos andinos". *Estudios Hidráulicos*, 4(3), 15-28.

SALAZAR, P. (2019). *Gestión del riesgo por erosión fluvial*. Cusco: Ande Investigaciones.

SÁNCHEZ, W. (2017). "Análisis energético del flujo en eventos de crecida". *Ingeniería del Agua*, 9(1), 50-62.

SILVA, D. (2020). *Manual de hidráulica aplicada*. Lima: Ediciones Ingeniería.

SUÁREZ, A. (2021). "Modelos hidrodinámicos para evaluación vial". *Revista Peruana de Ingeniería Civil*, 13(2), 18-33.

TORO, R. (2018). *Hidrodinámica para ingeniería fluvial*. Bogotá: Ecoe.

TORRES, C. (2019). "Evaluación morfológica de ríos de montaña". *Revista Andina de Recursos Hídricos*, 2(1), 10-22.

TORRES SUYO, Raúl. (2021) "*Identificación de zonas vulnerables mediante análisis hidrodinámico en el valle del Mantaro*". Huancayo: Universidad Nacional del Centro del Perú.



VAN GINKEL, Kees C. H.; DOTTORI, Francesco; ALFIERI, Lorenzo; FEYEN, Luc y KOKS, Elco E (2021). “*Flood risk assessment of the European road network*”. Natural Hazards and Earth System Sciences, vol. 21, no. 3, p. 1011-1027.

VELÁSQUEZ, J. (2020). “Vulnerabilidad vial asociada a procesos hidrodinámicos en el valle del Mantaro”. *Revista Técnica UNCP*, 15(2), 44-59.

VENTURA, L. (2021). *Procesos erosivos y estabilidad de taludes*. Lima: Ingeniería y Territorio.

XIA, Jun; ZHAO, Li y WANG, Chao.(2022). “*Coupled 1D–2D hydraulic modelling to assess road vulnerability during floods*”. *Water* [en línea]. 2022, 14(7), 1120. Disponible en: <https://www.mdpi.com>.

ZAVALETA, M. (2022). *Aplicaciones de modelación hidráulica en gestión vial*. Huancayo: Centro de Investigación Aplicada.



ANEXOS



ANEXO A: MATRIZ DE CONSISTENCIA

Tabla 21 — Matriz de consistencia.

TITULO: Análisis hidrodinámico para determinar la vulnerabilidad de la infraestructura vial ante desbordes fluviales en el tramo Km 339+200 al 343+200 del río Chalhuanca, Apurímac, 2025

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES E INDICADORES			METODOLOGÍA
Problema General: ¿De qué manera el análisis hidrodinámico influye en la vulnerabilidad de la infraestructura vial ante desbordes fluviales en el tramo Km 339+200 al 343+200 del río Chalhuanca, Apurímac, 2025?.	Objetivo General: Determinar de qué manera el análisis hidrodinámico influye en la vulnerabilidad de la infraestructura vial ante desbordes fluviales en el tramo Km 339+200 al Km 343+200 del río Chalhuanca, Apurímac, 2025.	Hipótesis General: El análisis hidrodinámico influye de manera significativa en la vulnerabilidad de la infraestructura vial ante desbordes fluviales en el tramo Km 339+200 al Km 343+200 del río Chalhuanca, Apurímac, 2025.	DIMENSIÓN	INDICADORES	UNIDAD	Tipo de investigación: Aplicada Nivel: Correlacional Diseño: No experimental-Transversal. La Población: población está compuesta por el tramo de infraestructura vial comprendido entre el km 339+200 - Km 343+200 Muestra: La muestra conformó por 10 puntos críticos seleccionados en
			VARIABLE INDEPENDIENTE: Análisis hidrodinámico			
			Caudal	- Caudal modelado - Caudal máximo en crecida	m³/s (metros cúbicos/seg)	
			Profundidad	- Puntos críticos de anegación - Afectaciones a la vía. - Profundidad máxima del flujo. .	m: metros	
Problemas Específicos: PE1: ¿De qué manera el análisis hidrodinámico influye en los daños estructurales potenciales de la infraestructura vial ante desbordes fluviales en el tramo Km 339+200 al Km 343+200 del río Chalhuanca, Apurímac, 2025?	Objetivos Específicos: OE1: Determinar de qué manera el análisis hidrodinámico influye en los daños estructurales potenciales de la infraestructura vial ante desbordes fluviales en el tramo Km 339+200 al Km 343+200 del río Chalhuanca, Apurímac, 2025.	Hipótesis Específicos: HE1: El análisis hidrodinámico influye de manera significativa en los daños estructurales potenciales de la infraestructura vial ante desbordes fluviales en el tramo Km 339+200 al Km 343+200 del río Chalhuanca, Apurímac, 2025.	Velocidad	- Flujo de direcciones - Velocidad del flujo	metros por segundo (m/s)	

PE2: ¿De qué manera el análisis hidrodinámico influye en los factores de amenaza fluvial de la infraestructura vial ante desbordes fluviales en el tramo Km 339+200 al Km 343+200 del río Chalhuanca, Apurímac, 2025?	OE2: Determinar de qué manera el análisis hidrodinámico influye en los factores de amenaza fluvial de la infraestructura vial ante desbordes fluviales en el tramo Km 339+200 al Km 343+200 del río Chalhuanca, Apurímac, 2025.	HE2: El análisis hidrodinámico influye de manera significativa en los factores de amenaza fluvial de la infraestructura vial ante desbordes fluviales en el tramo Km 339+200 al Km 343+200 del río Chalhuanca, Apurímac, 2025.	VARIABLE DEPENDIENTE: Vulnerabilidad de la Infraestructura vial			campo y referenciados dentro de los 4 km. Técnicas: -Revisión histórica -Observación directa en campo. Instrumentos: - Ficha de levantamiento topográfico - Ficha de Ensayos de Suelo - Ficha de Simulación Hidrodinámica - Ficha de datos hidrológicos - Ficha de campo o de registro de características visuales - Registro fotográfico
			Daños estructurales	- Desbordes fluviales. - Daños laterales. - Erosión del talud.	Registro fotográfico /m afectados	
			Amenaza fluvial	- Régimen hidráulico - Pendiente hidráulica	- Número de Froude. - Zonas con flujo supercrítico (Fr > 1). m/m	
			Índice de vulnerabilidad vial	- Nivel de vulnerabilidad por punto crítico - Clasificación de niveles: Muy baja, Baja, Media, Alta, Muy alta.	Escala cualitativa ordinal	

ANEXO B. INSTRUMENTOS DE RECOLECCION DE DATOS

RESULTADOS DE LABORATORIO



LABORATORIO DE SUELOS Y CONCRETO
ENGINEERING : CONSTRUCTION
RUC : 20609203570

997374026 / 985190483
MALACALLE - SANJAY MZ B 172, ABANCAY, PERU



PROYECTO : Análisis Hidrodinámico y modelos predictivos para evaluar la infraestructura vial ante desbordes fluviales tramo km 336+950 al 340+950 del río Chalhuanca, Apurímac, 2025. **MUESTRA :** C-01

LUGAR : Chalhuanca, Apurímac **FECHA :** Abril, 2025

SOLICITA : Bach. José Armando Condori Arone

DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DE UN SUELO
[NTP 339.037 | ASTM D2216 | MTCE108]

CONTENIDO DE HUMEDAD		CH			PROMEDIO
		T1	T2	T3	
1	Tara N°				21,96%
2	Peso de la tara + Peso del suelo húmedo (gr)	68,2	64,6	69,8	
3	Peso de la tara + Peso del suelo seco (gr)	59,02	56,8	61,1	
4	Peso del agua contenida (gr) (2) - (3)	9,18	7,80	8,70	
5	Peso de la tara (gr)	20,00	20,00	20,00	
6	Peso del suelo seco (gr) (3) - (5)	39,02	36,8	41,1	
7	Contenido de humedad (%) (4) / (6)	23,53%	21,20%	21,17%	


INGENIEROS
 RUC: 20609203570
don R. Nahuir Macabeza
 COORDINADOR ECX LAB
 QIP N° 296760

Figura 3 — Determinación de contenido de humedad C-1.



LABORATORIO DE SUELOS Y CONCRETO
ENGINEERING, CONSTRUCTION
RUC : 20609203570

997374826 / 99580489
MAUCACALLE - SAMUNAY MZ B N°2, ABAUCAY, PERU



PROYECTO : Análisis Hidrodinámico y modelos predictivos para evaluar la infraestructura vial ante desbordes fluviales tramo km 336+950 al 340+950 del río Chalhuanca, Apurímac, 2025.

LUGAR : Chalhuanca, Apurímac

SOLICITA : Bach. José Amado Condori Arone

MUESTRA : C-02

FECHA: Abril, 2025

DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DE UN SUELO
[NTP 339.037 | ASTM D2216 | MTC E108]

CONTENIDO DE HUMEDAD		CH			PROMEDIO
		T1	T2	T3	
1	Tara N°				18,23%
2	Peso de la tara + Peso del suelo húmedo (gr)	75,2	79,2	80,2	
3	Peso de la tara + Peso del suelo seco (gr)	68,2	71,9	72,2	
4	Peso del agua contenida (gr) (2) - (3)	7,00	7,30	8,00	
5	Peso de la tara (gr)	30,00	30,00	30,00	
6	Peso del suelo seco (gr) (3) - (5)	38,2	41,9	42,2	
7	Contenido de humedad (%) (4) / (6)	18,32%	17,42%	18,96%	


INGENIEROS
 RUC: 20609203570
Don R. Nahuirímacabeza
 COORDINADOR ECK LAB
 CIP N° 296788

Figura 4 — Determinación de contenido de humedad C-2.



LABORATORIO
RUC : 20609203570

LABORATORIO DE SUELOS Y CONCRETO
ENGINEERING : CONSTRUCTION

997374826 / 985190489
MAUCACALLE - SANJAY MZ B IT2, ABANCAY, PERU



PROYECTO : Análisis Hidrodinámico y modelos predictivos para evaluar la infraestructura vial ante desbordes fluviales tramo km 336+950 al 340+950 del río Challuanka, Apurímac.

LUGAR : Challuanka, Apurímac

SOLICITA : Bach. José Armando Condoni Arone

MUESTRA : C-03

FECHA : Abril, 2025

DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DE UN SUELO
[NTP 339.037 | ASTM D2216 | MTC E108]

CONTENIDO DE HUMEDAD		CH			PROMEDIO
		T1	T2	T3	
1	Tara N°				
2	Peso de la tara + Peso del suelo húmedo (gr)	72,5	69,2	65,2	
3	Peso de la tara + Peso del suelo seco (gr)	65,00	61,80	58,40	
4	Peso del agua contenida (gr) (2) - (3)	7,50	7,40	6,80	20,63%
5	Peso de la tara (gr)	30,00	25,00	25,00	
6	Peso del suelo seco (gr) (3) - (5)	35	36,8	33,4	
7	Contenido de humedad (%) (4) / (6)	21,43%	20,11%	20,36%	


INGENIEROS
 RUC: 20609203570
John R. Nahuir Macabeza
 COORDINADOR ECX LAB
 CIP N° 296789

Figura 5 — Determinación de contenido de humedad C-3.



LABORATORIO DE SUELOS Y CONCRETO
ENGINEERING : CONSTRUCTION
RUC : 20609203570



997374826 / 985190489
MAUCACALLE - SANJAY MZ B N°2, ABANCAY, PERU

PROYECTO : Análisis Hidrodinámico y modelos predictivos para evaluar la infraestructura vial ante desbordes fluviales tramo km 336+950 al 340+950 del río Chalhuanca, Apurímac, 2025.

LUGAR : Chalhuanca, Apurímac

SOLICITA : Bach. José Amundo Condori Arone

MUESTRA : C-04

FECHA : Abril, 2025

DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DE UN SUELO
[NTP 339.037 | ASTM D2216 | MTC E108]

CONTENIDO DE HUMEDAD		CH			PROMEDIO
		T1	T2	T3	
1	Tara N°				
2	Peso de la tara + Peso del suelo húmedo (gr)	85,6	88,5	81,2	
3	Peso de la tara + Peso del suelo seco (gr)	78,1	81,2	74,5	
4	Peso del agua contenida (gr) (2) - (3)	7,5	7,3	6,7	15,97%
5	Peso de la tara (gr)	33,00	33,00	33,00	
6	Peso del suelo seco (gr) (3) - (5)	45,1	48,2	41,5	
7	Contenido de humedad (%) (4) / (6)	16,63%	15,15%	16,14%	


INGENIEROS
 RUC: 20609203570
John R. Nahuimacabeza
 COORDINADOR ECX LAB
 CUI N° 206789

Figura 6 — Determinación de contenido de humedad C-4.



LABORATORIO DE SUELOS Y CONCRETO
ENGINEERING - CONSTRUCTION
RUC : 20609203570



997374826 / 985190489
MAUCACALLE - SANMAY MZ B N°2, ABANCAY, PERU

PROYECTO : Análisis Hidrodinámico y modelos predictivos para evaluar la infraestructura vial ante desbordes fluviales tramo km 336+950 al 340+950 del río Chalhuanca, Apurímac, 2025.

LUGAR : Chalhuanca, Apurímac

SOLICITA : Bach. José Armando Condori Arone

MUESTRA : C-05

FECHA : Abril 2025

DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DE UN SUELO
[NTP 339.037 | ASTM D2216 | MET E108]

CONTENIDO DE HUMEDAD		CH			PROMEDIO
		T1	T2	T3	
1	Tara N°				
2	Peso de la tara + Peso del suelo húmedo (gr)	86,5	87,1	81,2	
3	Peso de la tara + Peso del suelo seco (gr)	76,5	77,2	72,1	
4	Peso del agua contenida (gr) (2) - (3)	10	9,9	9,1	21,86%
5	Peso de la tara (gr)	33,00	30,00	30,00	
6	Peso del suelo seco (gr) (3) - (5)	43,5	47,2	42,1	
7	Contenido de humedad (%) (4) / (6)	22,99%	20,97%	21,62%	


Jhon R. Nahirimacabeza
 COORDINADOR DE LAB.
 RUC: 20609203570

Figura 7 — Determinación de contenido de humedad C-5.



LABORATORIO DE SUELOS Y CONCRETO
ENGINEERING · CONSTRUCTION
RUC : 20609203570

LABORATORIO DE SUELOS Y CONCRETO
ENGINEERING · CONSTRUCTION
997374826 / 985190489
MAUCACALLE - SANJAY MIZ B 172, ABAIKAY, PERU



PROYECTO : Análisis Hidrodinámico y modelos predictivos para evaluar la infraestructura vial ante desbordes fluviales tramo km 336+950 al 340+950 del río Challuanea, Apurímac, 2025. **MUESTRA :** C-06

LUGAR : Challuanea, Apurímac

SOLICITA : Bach. José Amando Condori Arone **FECHA :** Abril, 2025

DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DE UN SUELO
[NTP 339.037 | ASTM D2216 | MTC E108]

CONTENIDO DE HUMEDAD		CH			PROMEDIO
		T1	T2	T3	
1	Tara N°				
2	Peso de la tara + Peso del suelo húmedo (gr)	75,8	79,2	77,6	
3	Peso de la tara + Peso del suelo seco (gr)	66,5	69,1	68,4	
4	Peso del agua contenida (gr) (2) - (3)	9,3	10,1	9,2	22,17%
5	Peso de la tara (gr)	25,00	25,00	25,00	
6	Peso del suelo seco (gr) (3) - (5)	41,5	44,1	43,4	
7	Contenido de humedad (%) (4) / (6)	22,41%	22,90%	21,20%	

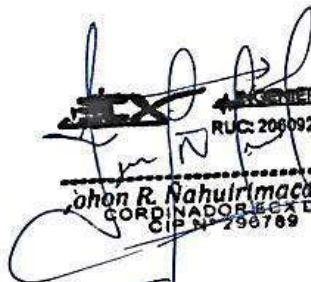

John R. Nahuir Macabeza
 COORDINADOR TECNICO
 CIP N° 798789
 RUC: 20609203570

Figura 8 — Determinación de contenido de humedad C-6.



LABORATORIO DE SUELOS Y CONCRETO
ENGINEERING - CONSTRUCTION
997374826 / 985190489
MAUCACALLE - SAMURAY MZ B (F2, ABANCAY, PERU)



PROYECTO : Análisis Hidrodinámico y modelos predictivos para evaluar la infraestructura vial ante desbordes fluviales tramo km 336+950 al 340+950 del río Chalhuanca, Apurímac, 2025.

MUESTRA : C-07

LUGAR : Chalhuanca, Apurímac

FECHA : Abril, 2025

SOLICITA : Bach. José Armando Condori Arone

DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DE UN SUELO
[NTP 339.037 | ASTM D2216 | MTC 6106]

CONTENIDO DE HUMEDAD		CH			PROMEDIO
		T1	T2	T3	
1	Tara N°				21,13%
2	Peso de la tara + Peso del suelo húmedo (gr)	90,2	88,6	81,2	
3	Peso de la tara + Peso del suelo seco (gr)	80,2	79,2	73,5	
4	Peso del agua contenida (gr) (2) - (3)	10	9,4	7,7	
5	Peso de la tara (gr)	35,00	35,00	35,00	
6	Peso del suelo seco (gr) (3) - (5)	45,2	44,2	38,5	
7	Contenido de humedad (%) (4) / (6)	22,12%	21,27%	20,00%	


INGENIEROS
RUC: 20609203570
John R. Nahirimacabeza
COORDINADOR ECL LAB
CIP N° 296789

Figura 9 — Determinación de contenido de humedad C-7.



LABORATORIO DE SUELOS Y CONCRETO
ENGINEERING - CONSTRUCTION
RUC : 20609203570

997374826 / 985190489
MAUCACALLE - SANJAY MZ B N°2, ABANCAY, PERU



PROYECTO : Análisis Hidrodinámico y modelos predictivos para evaluar la infraestructura vial ante desbordes fluviales tramo km.336+950 al 340+950 del río Chalhuanca, Apurímac, 2025.

LUGAR : Chalhuanca, Apurímac

SOLICITA : Bach. José Armando Condori Arque

MUESTRA : C-08

FECHA : Abril, 2025

DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DE UN SUELO
[NTP 339.037 / ASTM D2216 / MTC E108]

CONTENIDO DE HUMEDAD		CH			PROMEDIO
		T1	T2	T3	
1	Tara N°				24,28%
2	Peso de la tara + Peso del suelo húmedo (gr)	76,25	74,1	79,6	
3	Peso de la tara + Peso del suelo seco (gr)	68,1	64,2	68,9	
4	Peso del agua contenida (gr) (2) - (3)	8,150	9,900	10,700	
5	Peso de la tara (gr)	33,00	25,00	25,00	
6	Peso del suelo seco (gr) (3) - (5)	35,1	39,2	43,9	
7	Contenido de humedad (%) (4) / (6)	23,22%	25,26%	24,37%	

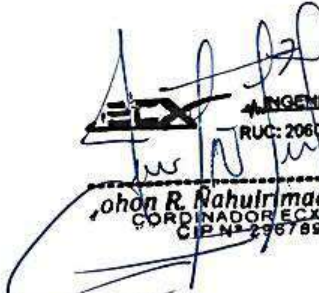

INGENIERO
 RUC: 20609203570
John R. Nahuir Macabeza
 COORDINADOR ECX LAB
 CIP N° 236789

Figura 10 — Determinación de contenido de humedad C-8.



LABORATORIO DE SUELOS Y CONCRETO
ENGINEERING - CONSTRUCTION
RUC : 20609203570

997374826 / 985190489
MAUCACALLE - SANJUAN MZ B IT2, ABAJCAY, PERU



PROYECTO : Análisis Hidrodinámico y modelos predictivos para evaluar la infraestructura vial ante desbordes fluviales tramo km 336+950 al 340+950 del río Chalhuanca, Apurímac, 2025. **MUESTRA :** C-09

LUGAR : Chalhuanca, Apurímac **FECHA :** Abril, 2025

SOLICITA : Bach. José Armando Condori Arcoz

DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DE UN SUELO
[NTP 339.037 | ASTM D2216 | MTC E108]

CONTENIDO DE HUMEDAD		CH			PROMEDIO
		T1	T2	T3	
1	Tara N°				
2	Peso de la tara + Peso del suelo húmedo (gr)	95,3	86,5	88,8	
3	Peso de la tara + Peso del suelo seco (gr)	85,1	76,3	78,9	
4	Peso del agua contenida (gr) (2) - (3)	10,2	10,2	9,9	
5	Peso de la tara (gr)	33,00	25,00	33,00	
6	Peso del suelo seco (gr) (3) - (5)	52,1	51,3	45,9	
7	Contenido de humedad (%) (4) / (6)	19,58%	19,88%	21,57%	20,34%


INGENIEROS
 RUC: 20609203570
John R. Nahuir Imacabeza
 COORDINADOR DE EXLAB
 CIP N° 296789

Figura 11 — Determinación de contenido de humedad C-9.



LABORATORIO DE SUELOS Y CONCRETO
 ENGINEERING - CONSTRUCTION
 997374826 / 985190469
 MAICACALLE - SANJAY MZ B IT2, ABAICAY, PERU



PROYECTO : Análisis Hidrodinámico y modelos predictivos para evaluar la infraestructura vial ante desbordes fluviales tramo km 336-950 al 340-950 del río Chulluana, Apurímac, 2025.

MUESTRA : C-10

LUGAR : Chulluana, Apurímac

FECHA : Abril, 2025

SOLICITA : Bach. José Armando Condori Arone

DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DE UN SUELO
[NTP 339.037 | ASTM D2216 | MTC E108]

CONTENIDO DE HUMEDAD		CH			PROMEDIO
		T1	T2	T3	
1	Tara N°				
2	Peso de la tara + Peso del suelo húmedo (gr)	89,5	76,4	71,2	
3	Peso de la tara + Peso del suelo seco (gr)	81,5	69,2	65,1	
4	Peso del agua contenida (gr) (2) - (3)	8	7,2	6,1	16,00%
5	Peso de la tara (gr)	33,00	25,00	25,00	
6	Peso del suelo seco (gr) (3) - (5)	48,5	44,2	40,1	
7	Contenido de humedad (%) (4) / (6)	16,49%	16,29%	15,21%	

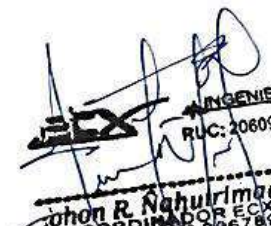

INGENIEROS
 RUC: 20609203570
John R. Nahuirimacabeza
 COORDINADOR ECX LAB
 CIP Nº 296789

Figura 12 — Determinación de contenido de humedad C-10.

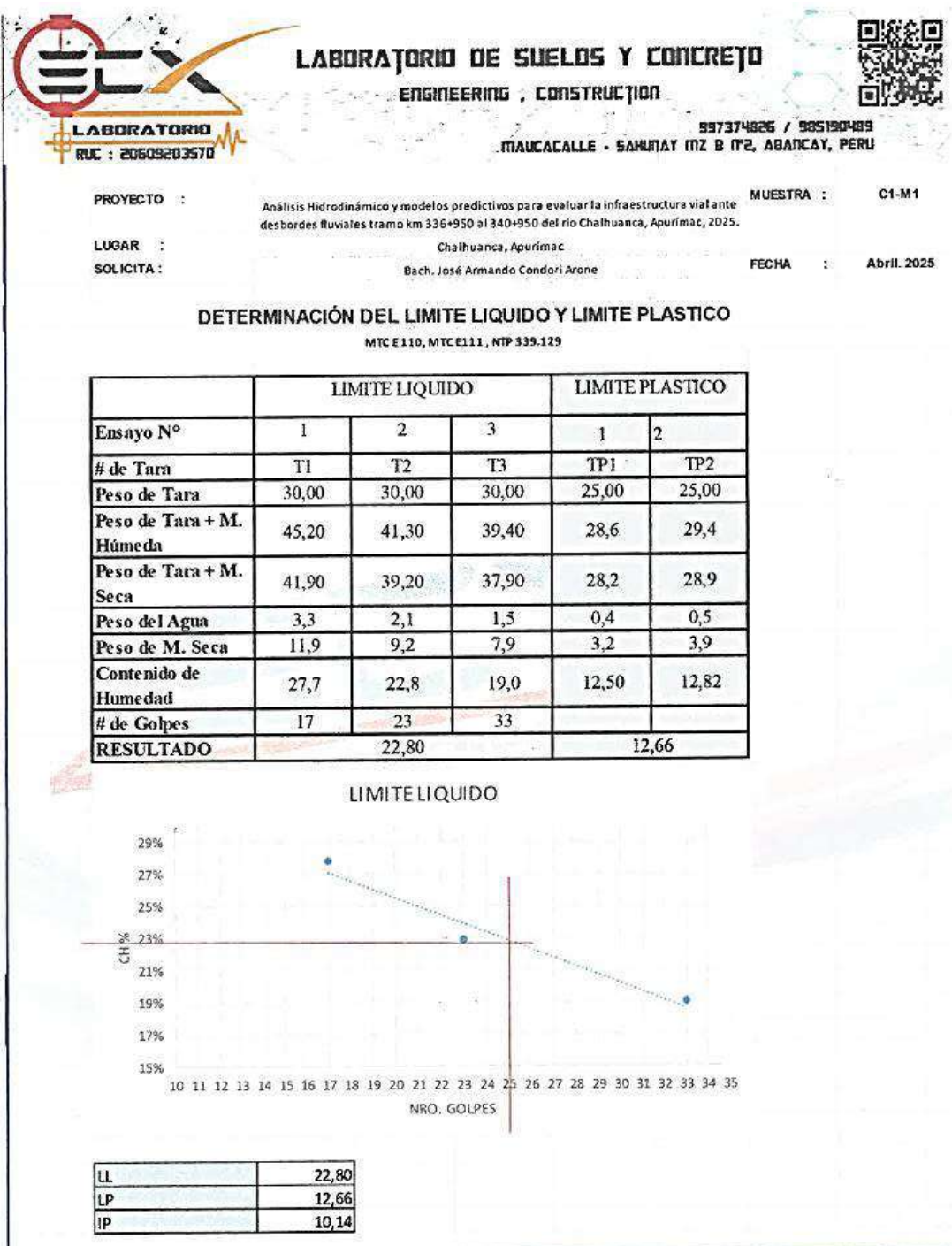
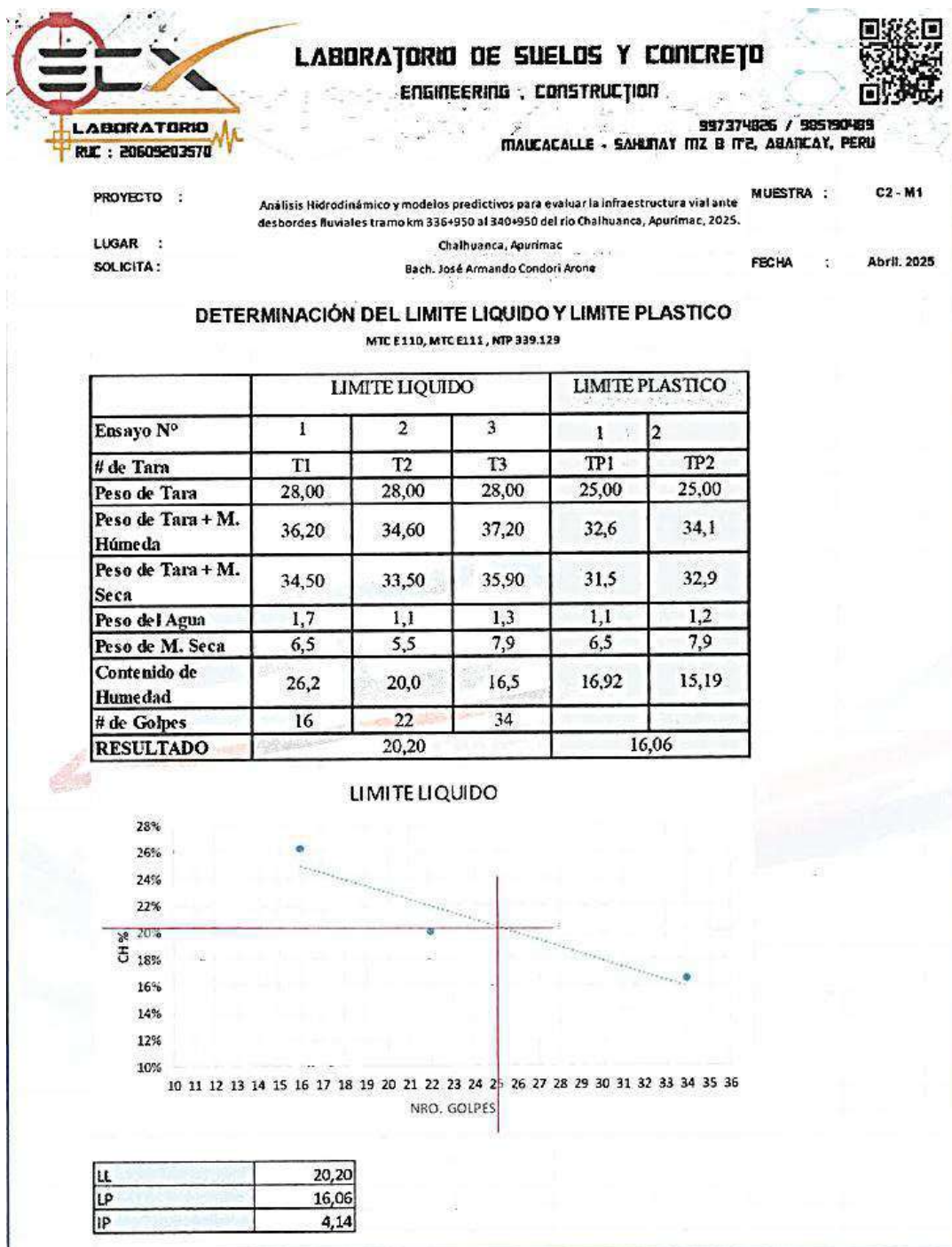
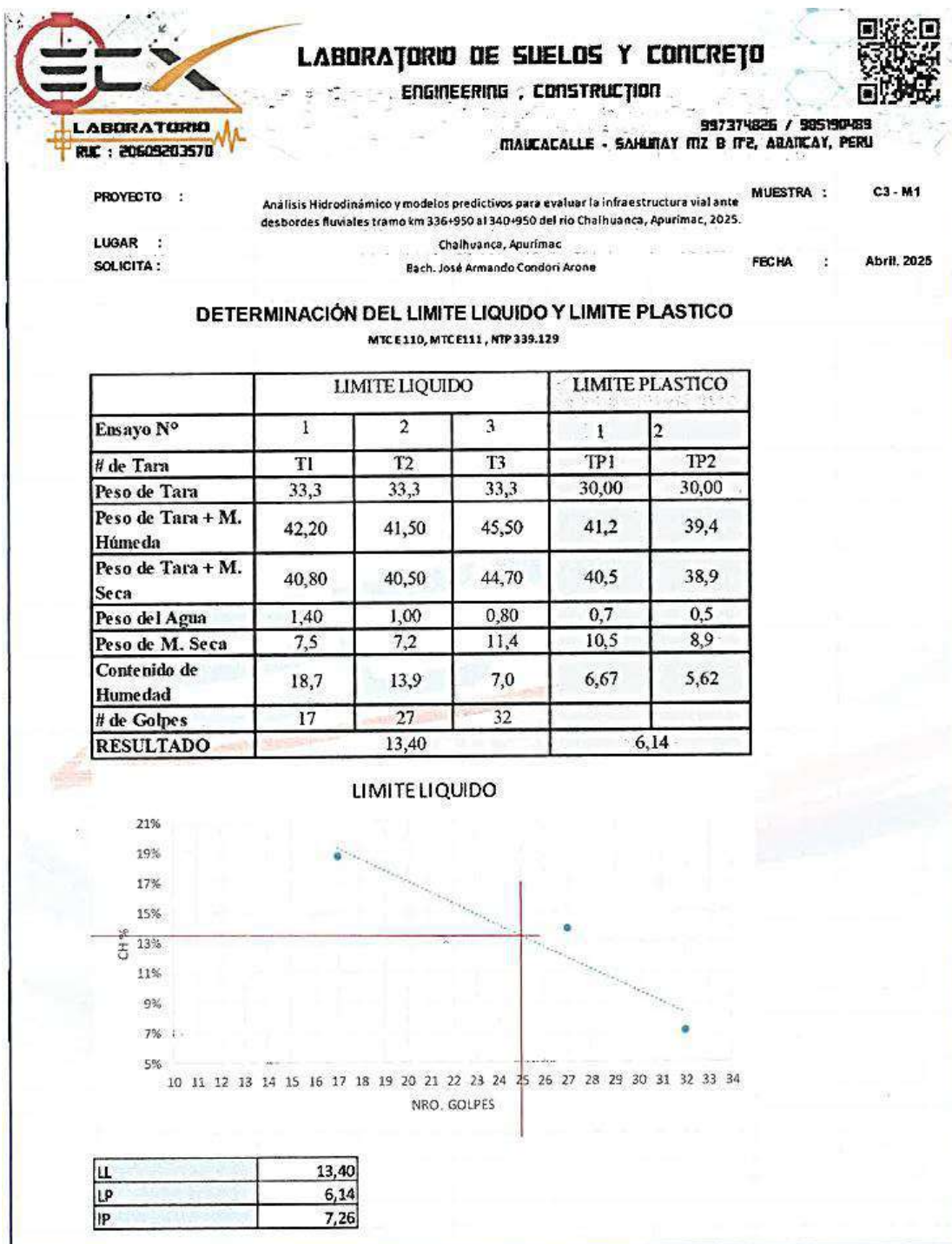


Figura 13 — Determinación de limite líquido y limite plástico C-1.




Jhon R. Nahuirima Cabeza
 COORDINADOR ECA LAB
 CIB N° 298789

Figura 14 — Determinación de limite líquido y limite plástico C-2.




INGENIEROS
 RUC: 20609203570
John R. Nahuirmacabeza
 COORDINADOR ECX LAB
 CIR N° 286789

Figura 15 — Determinación de limite líquido y limite plástico C-3.

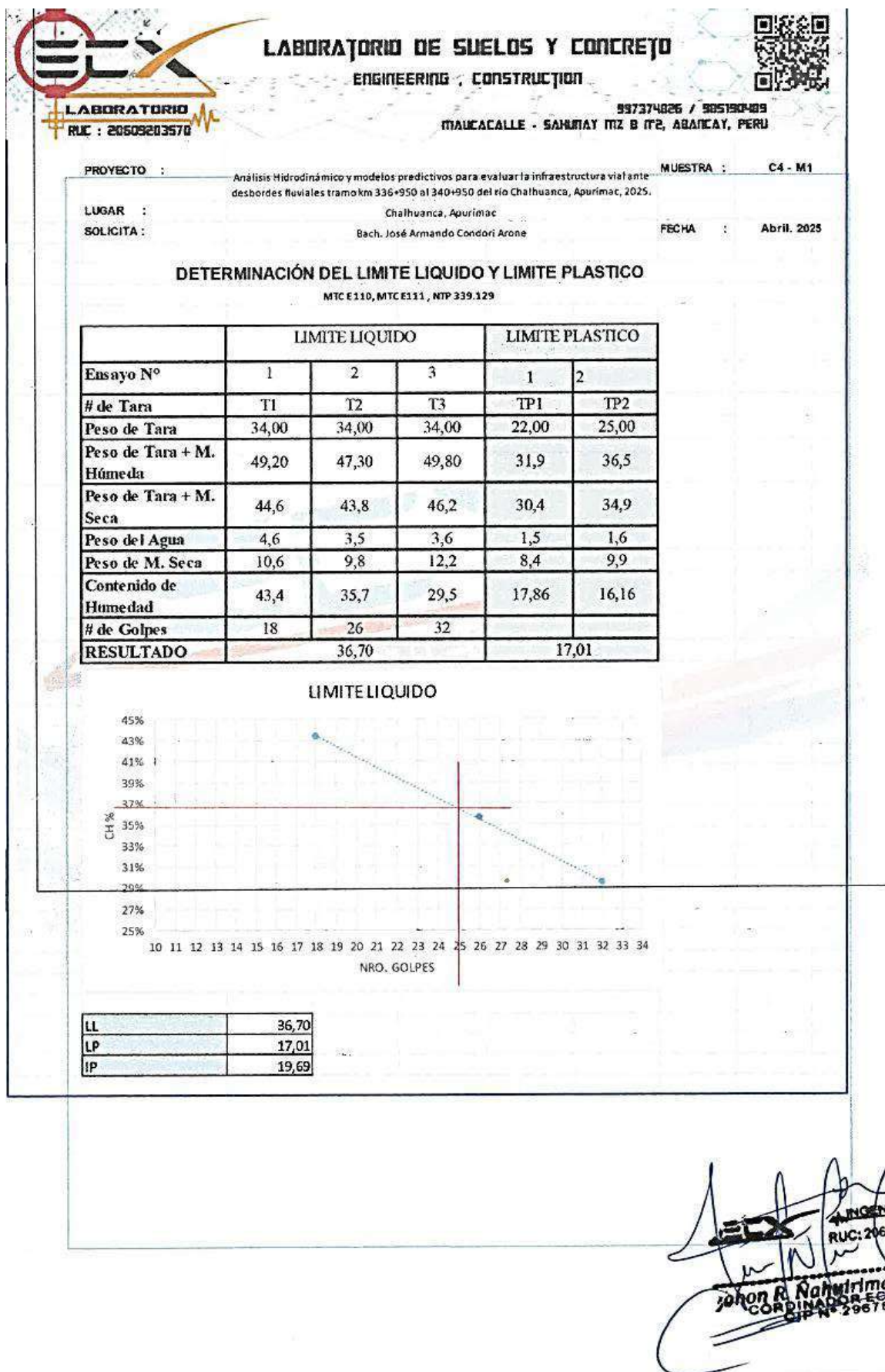
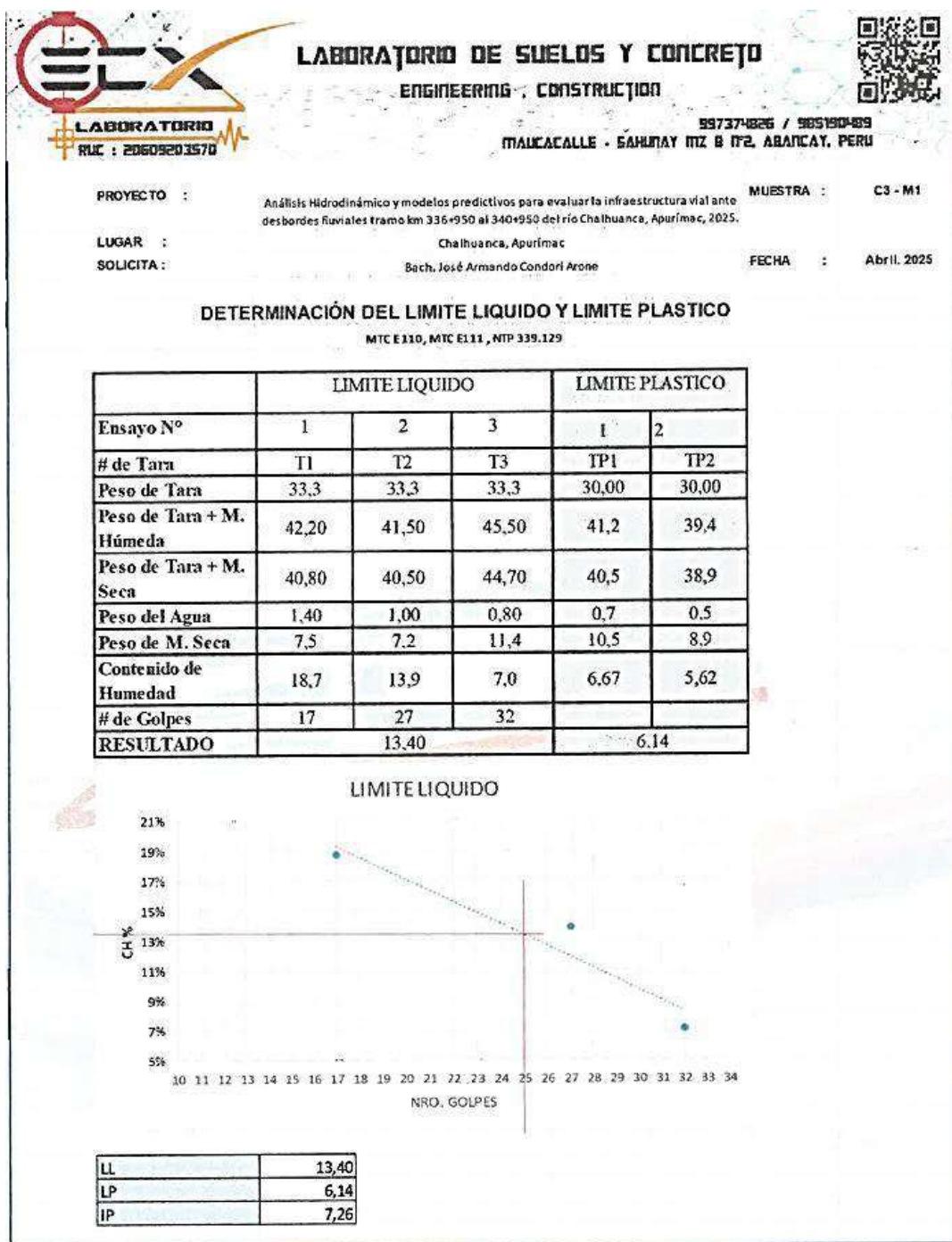


Figura 16 — Determinación de limite líquido y limite plástico C-4.




INGENIEROS
 RUC: 20609203570
Johan R. Nahuirmacabeza
 COORDINADOR ECX-LAS
 CIR N° 296789

Figura 17 — Determinación de limite líquido y limite plástico C-5.

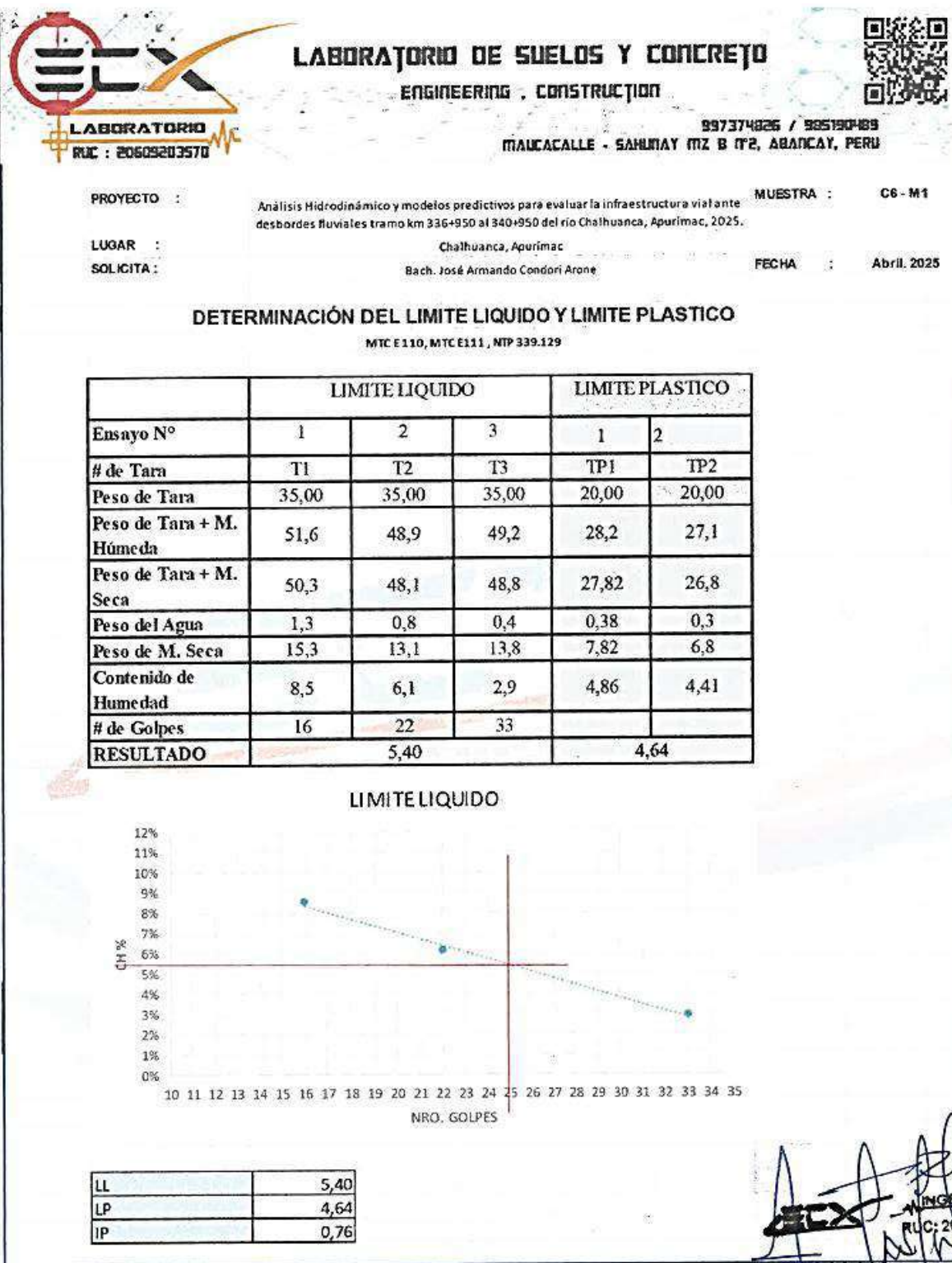


Figura 18 — Determinación de limite líquido y limite plástico C-6.

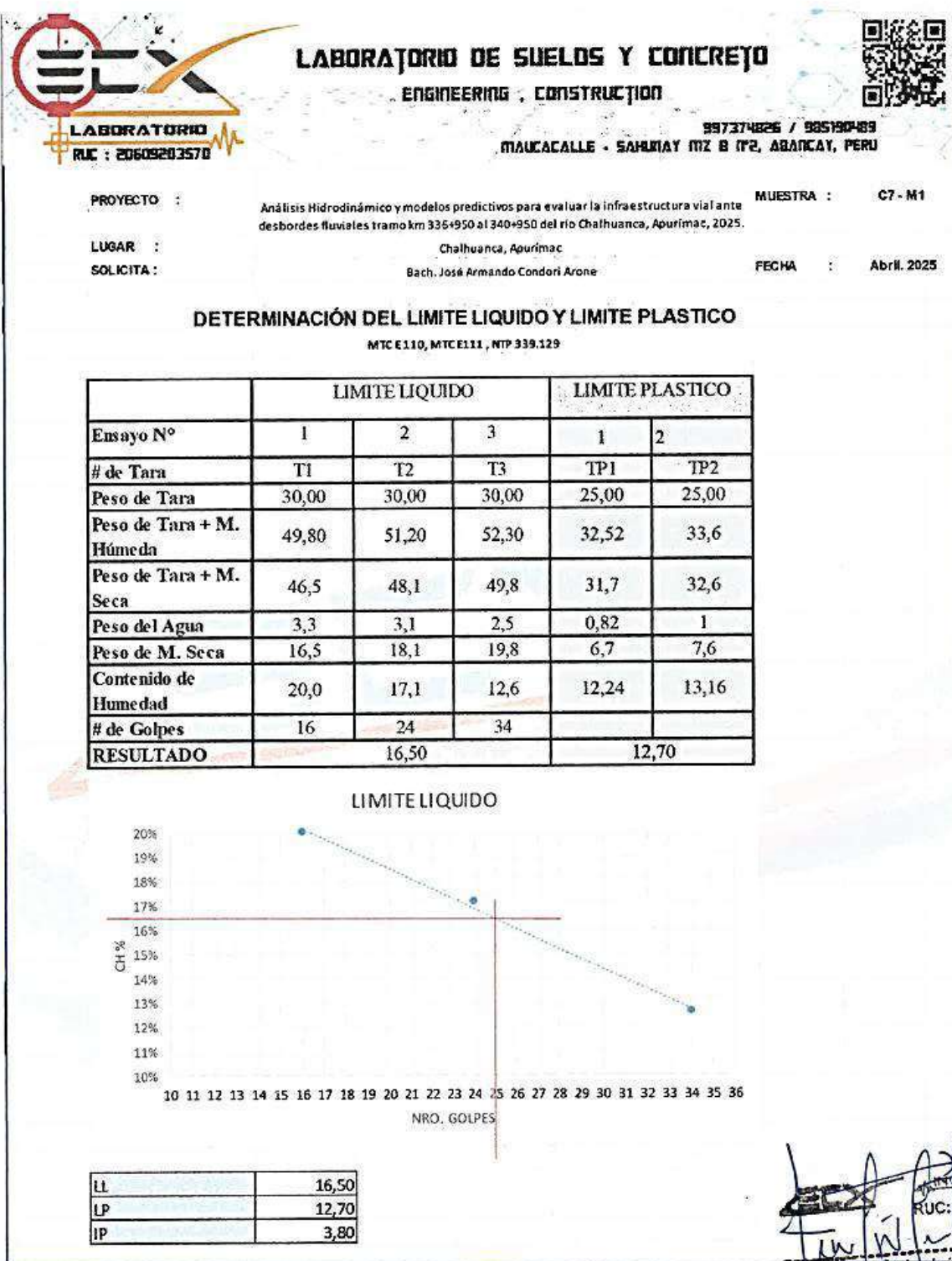


Figura 19 — Determinación de limite líquido y limite plástico C-7.

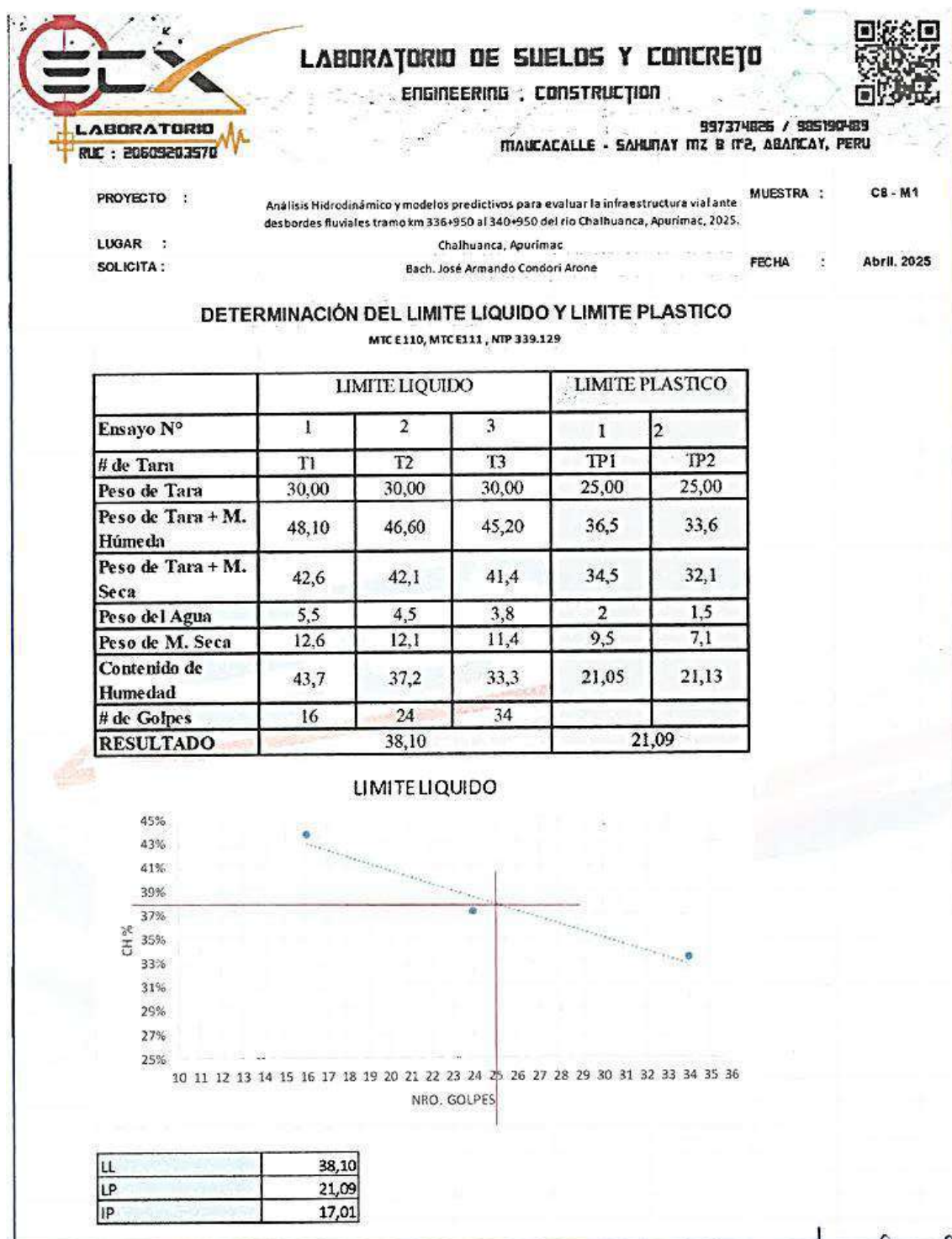


Figura 20 — Determinación de limite líquido y limite plástico C-8.

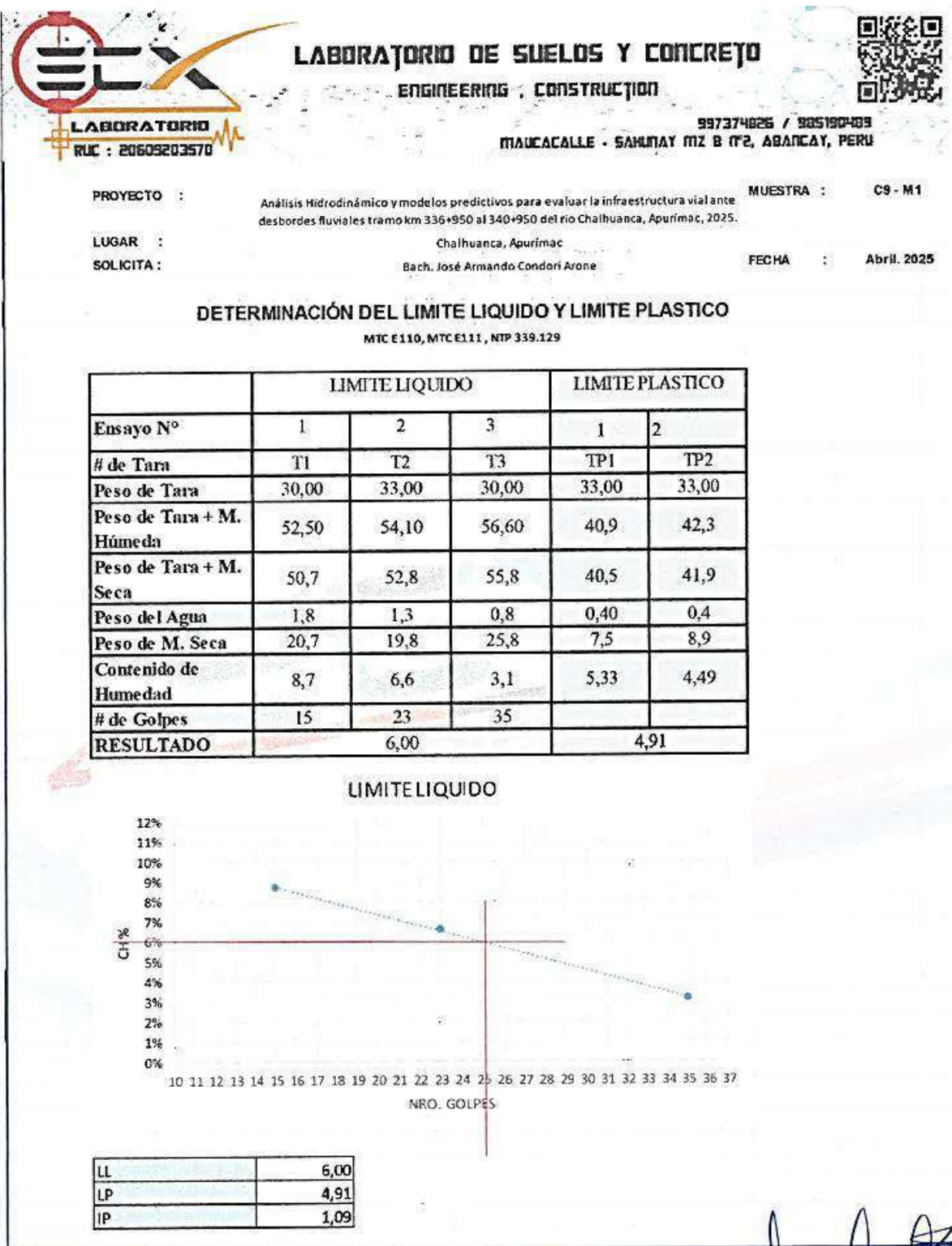


Figura 21 — Determinación de limite líquido y limite plástico C-9.



LABORATORIO DE SUELOS Y CONCRETO ENGINEERING , CONSTRUCTION



997374826 / 985190483
MAUCACALLE - SAHUMAY MZ B IT2, ABANCAY, PERU

PROYECTO :

Análisis Hidrodinámico y modelos predictivos para evaluar la infraestructura vial ante desbordes fluviales tramo km 336+950 al 340+950 del río Chalhuanca, Apurímac, 2025.

MUESTRA : C10 - M1

LUGAR :

Chalhuanca, Apurímac

SOLICITA :

Bach. José Armando Condori Arone

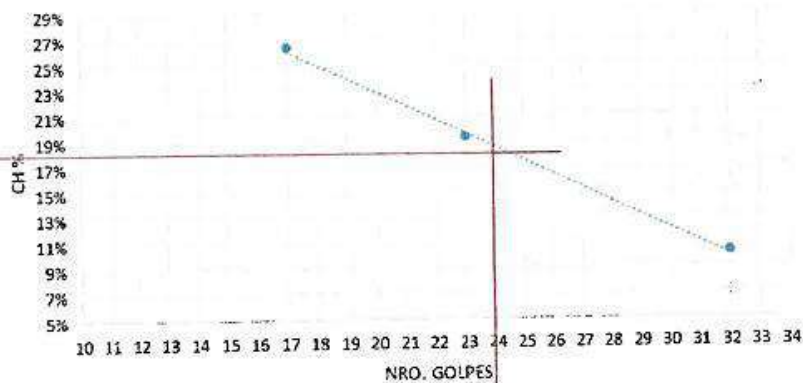
FECHA : Abril, 2025

DETERMINACIÓN DEL LIMITE LIQUIDO Y LIMITE PLASTICO

MTD E110, MTC E111, NTP 339.129

Ensayo N°	LIMITE LIQUIDO			LIMITE PLASTICO	
	1	2	3	1	2
# de Tara	T1	T2	T3	TP1	TP2
Peso de Tara	25,00	26,00	25,00	22,00	24,00
Peso de Tara + M. Húmeda	34,60	38,40	39,20	29,5	31,6
Peso de Tara + M. Seca	32,60	36,40	37,90	28,8	30,9
Peso del Agua	2	2	1,3	0,7	0,7
Peso de M. Seca	7,6	10,4	12,9	6,8	6,9
Contenido de Humedad	26,3	19,2	10,1	10,29	10,14
# de Golpes	17	23	32		
RESULTADO	18,00			10,22	

LIMITE LIQUIDO



LL	18,00
LP	10,22
IP	7,78

INGENIEROS
RUC: 20609203570

Johan R. Nahuirima Cabeza
COORDINADOR ESX LAB
CIP N° 296789

Figura 22 — Determinación de limite líquido y limite plástico C-10.

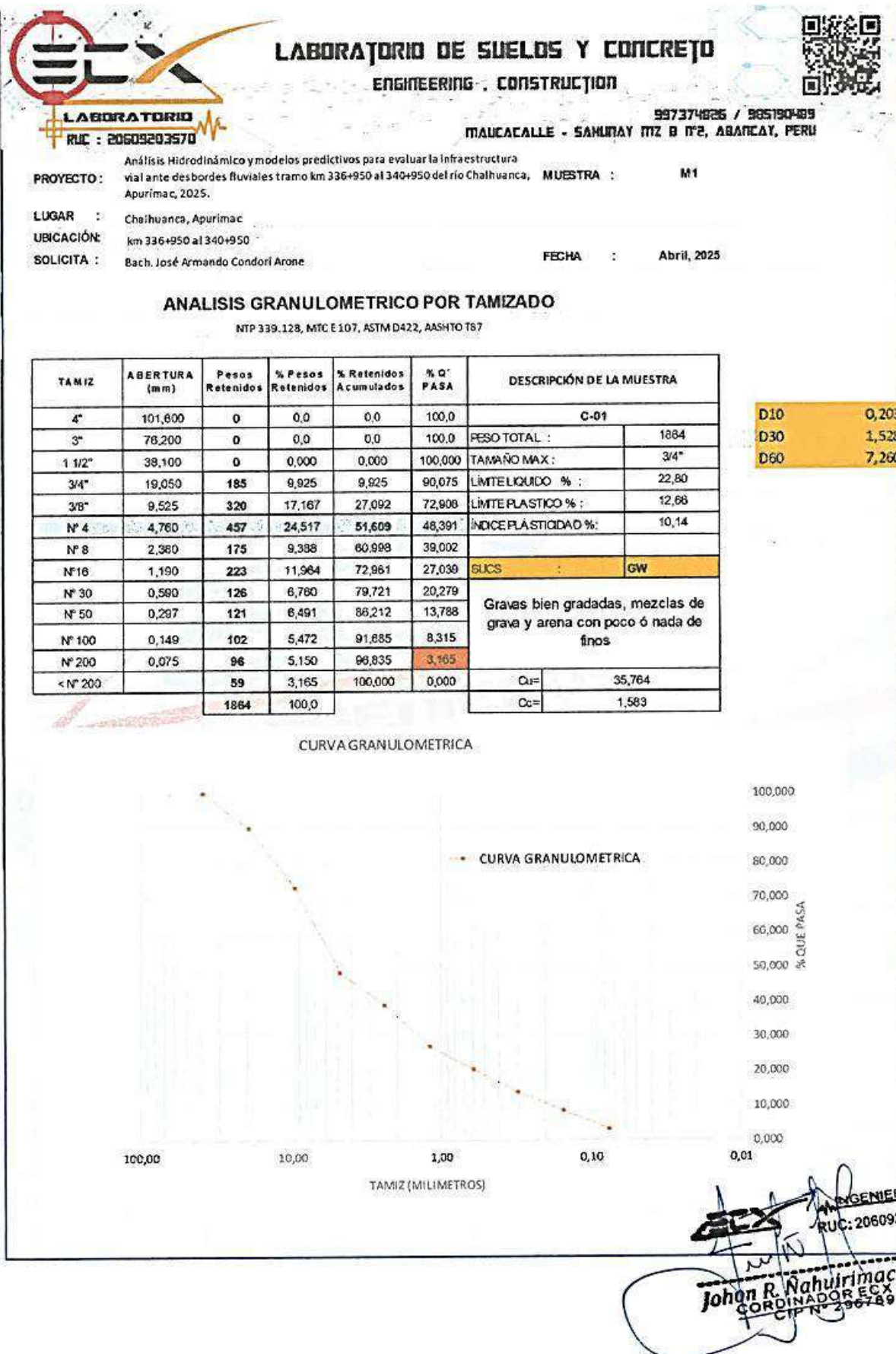


Figura 23 — Curva granulométrica C-01.

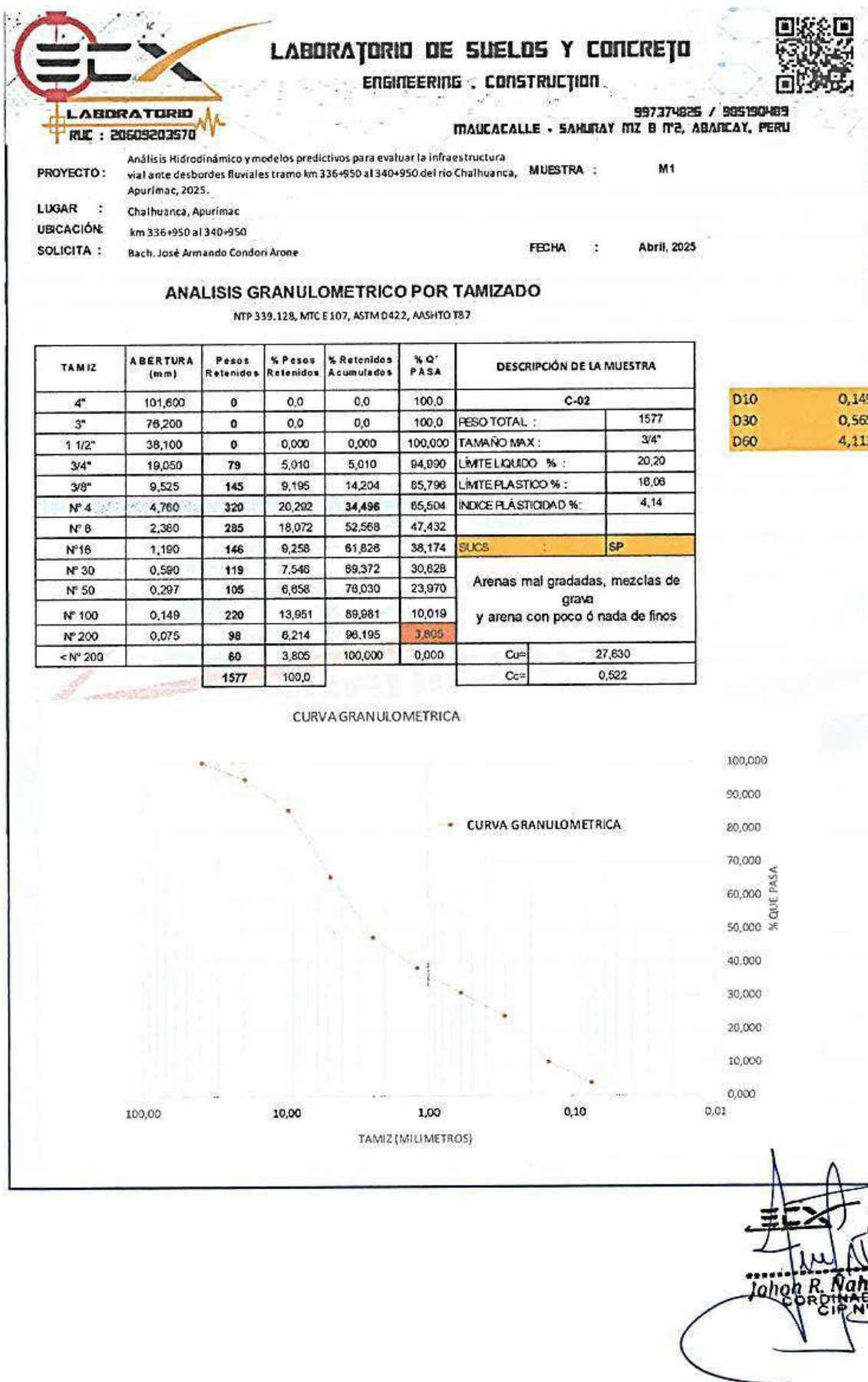


Figura 24 — Curva granulométrica C-02.

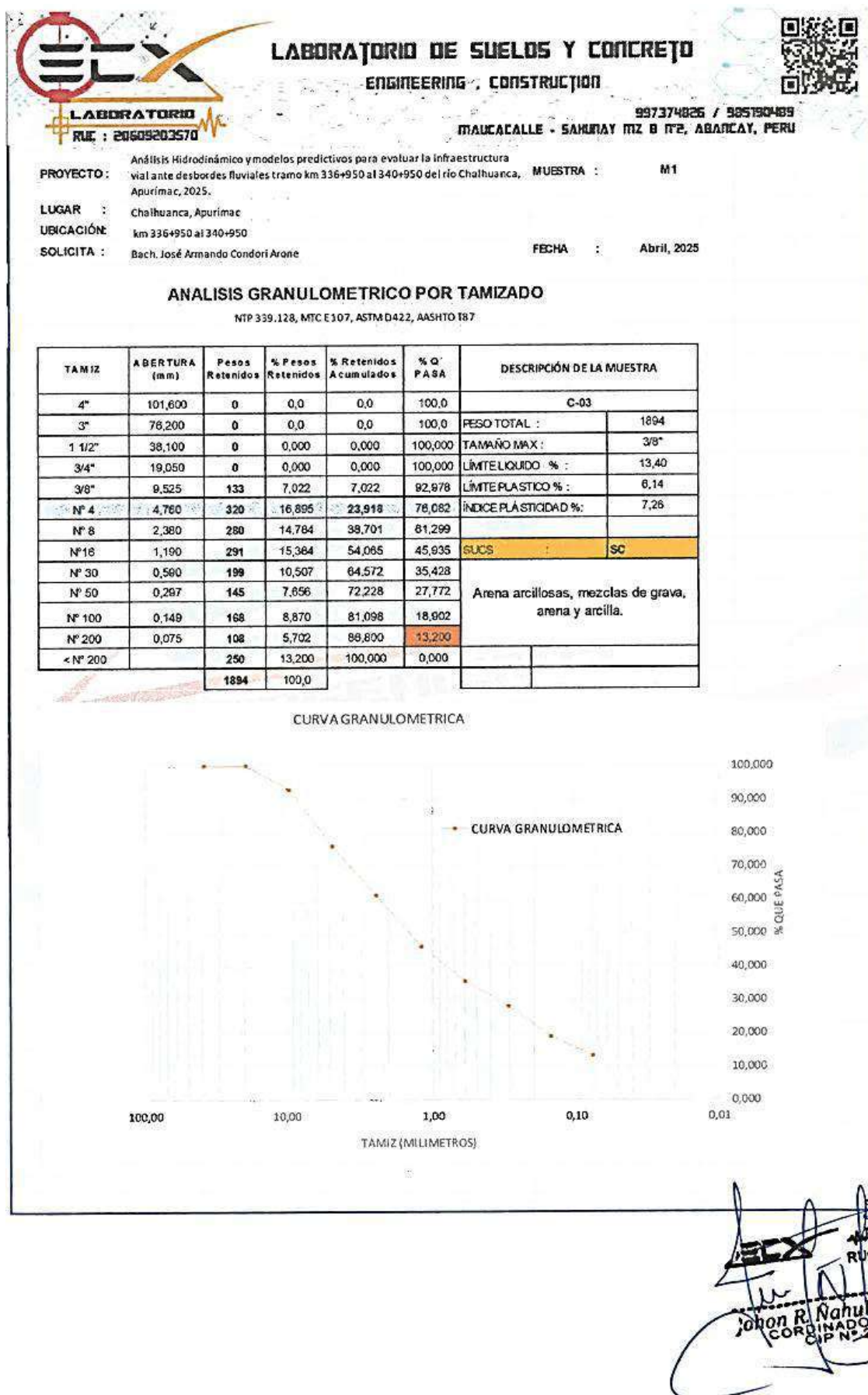


Figura 25 — Curva granulométrica C-03.

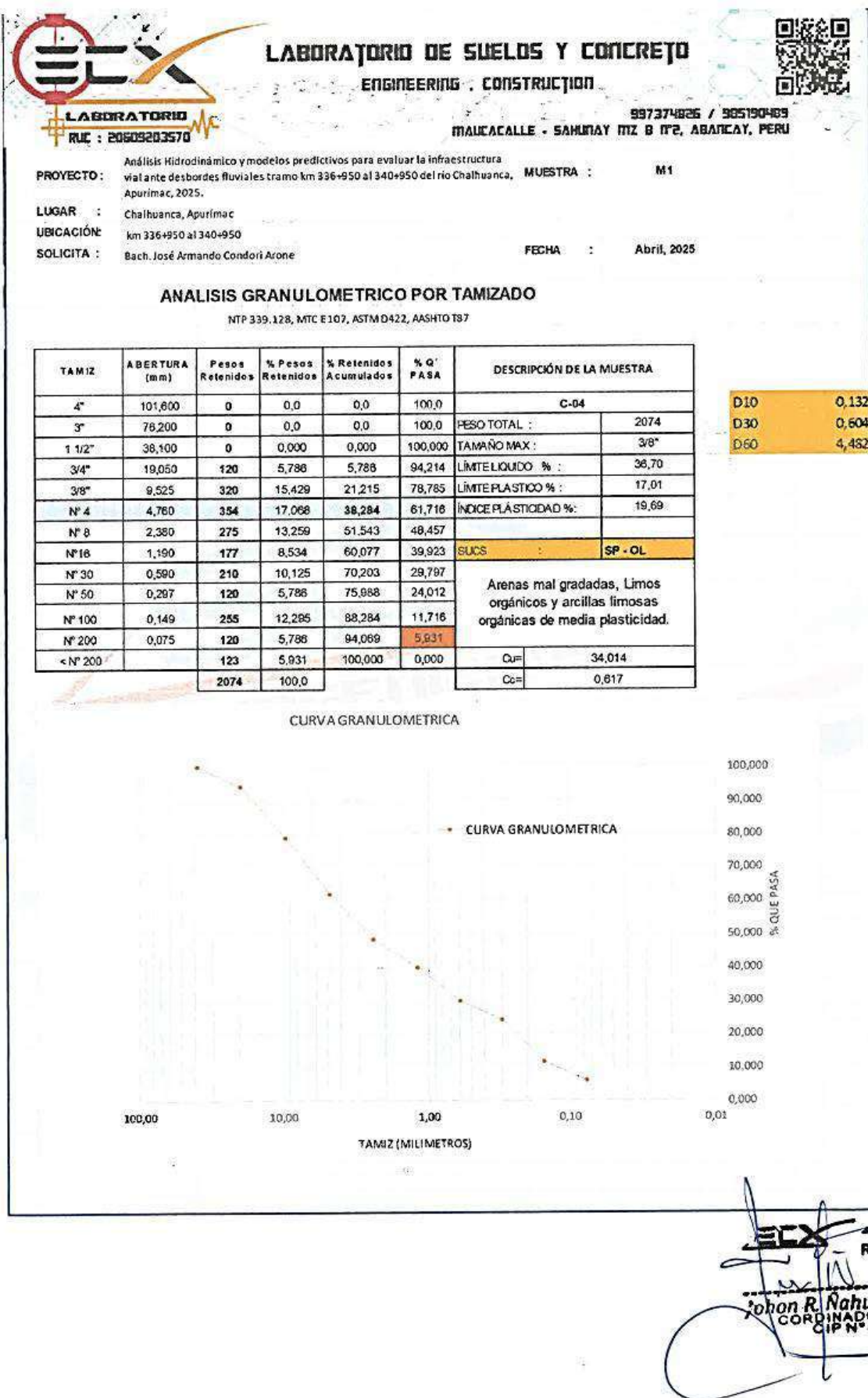


Figura 26 — Curva granulométrica C-04.

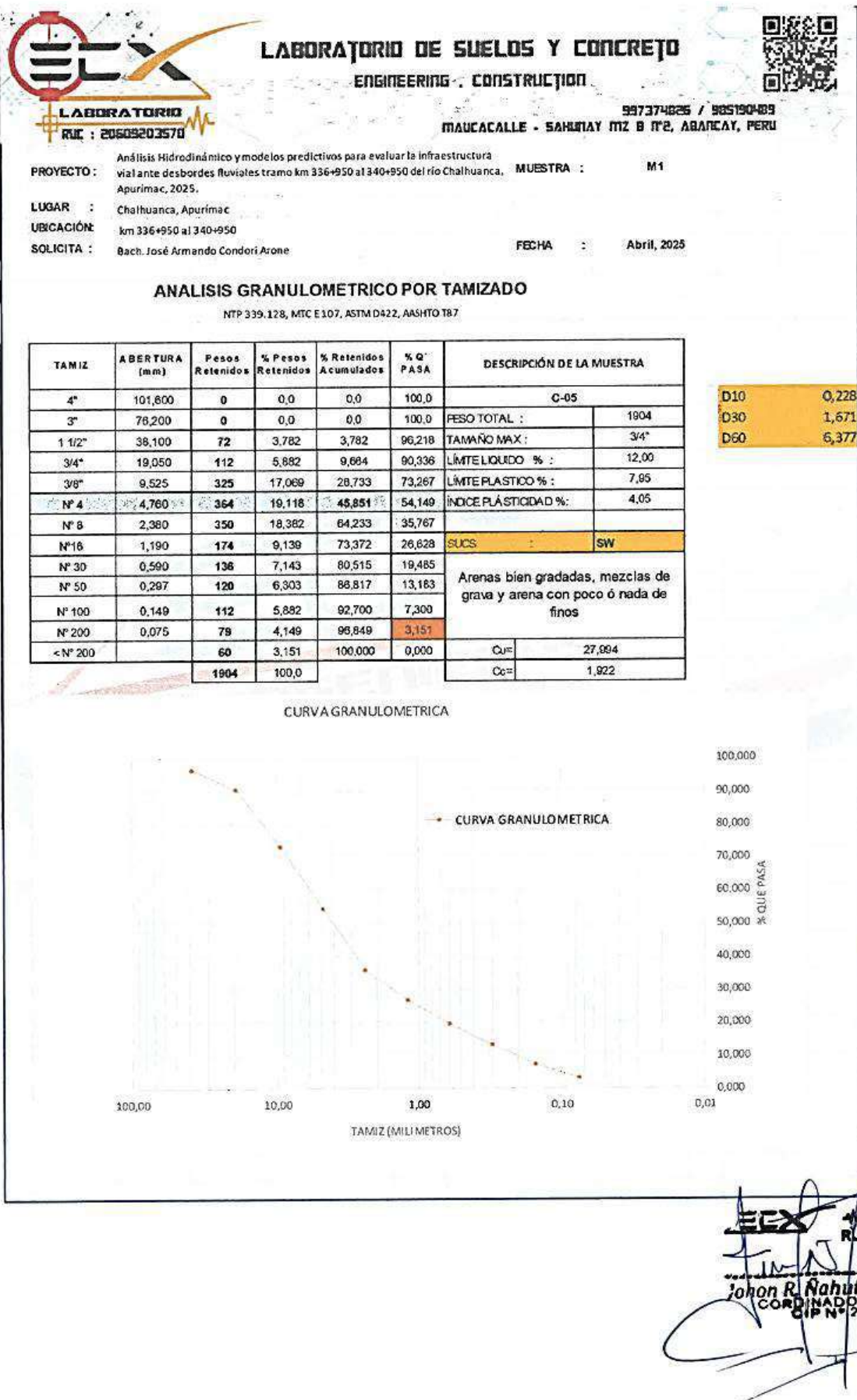
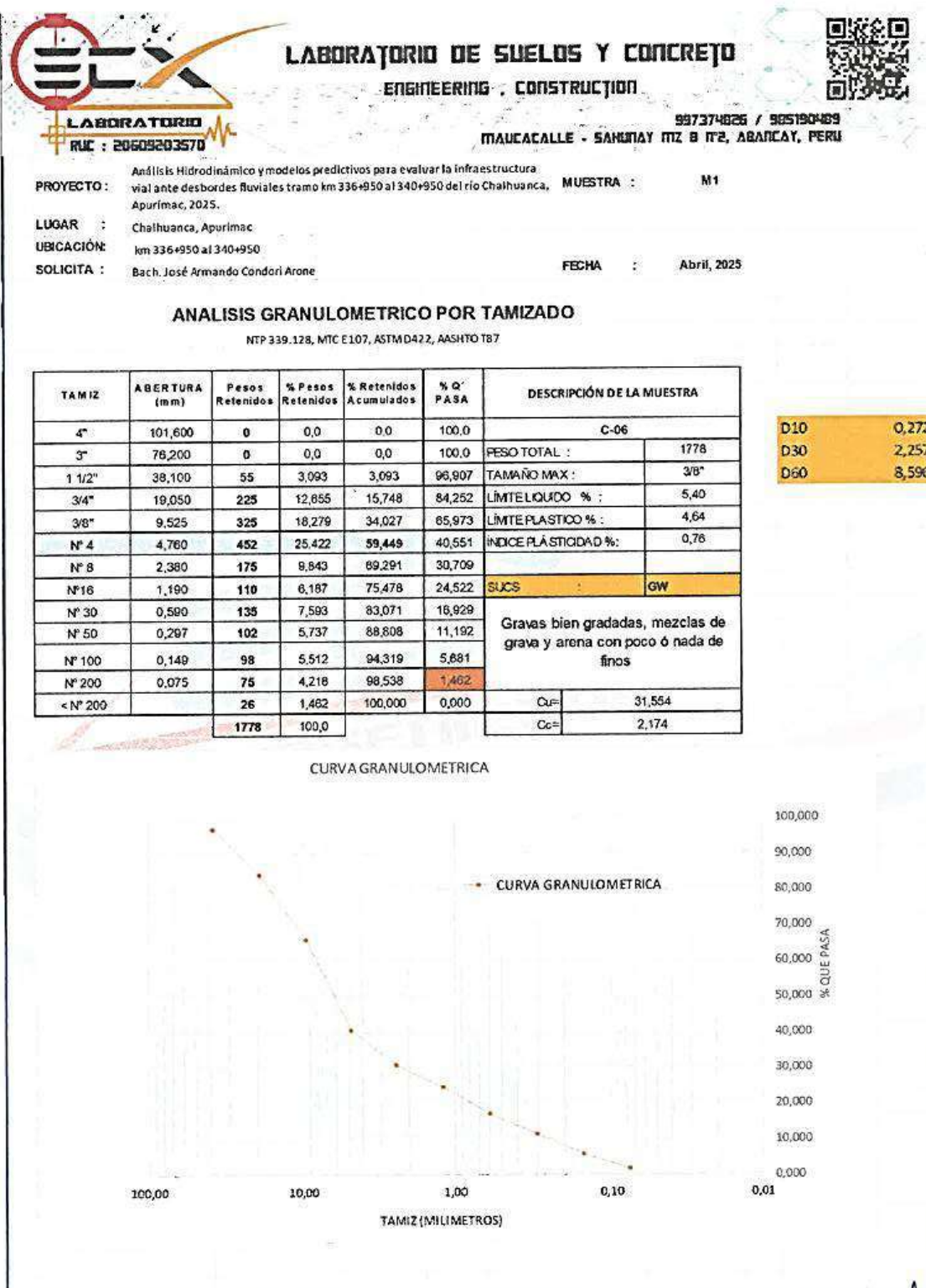


Figura 27 — Curva granulométrica C-05.



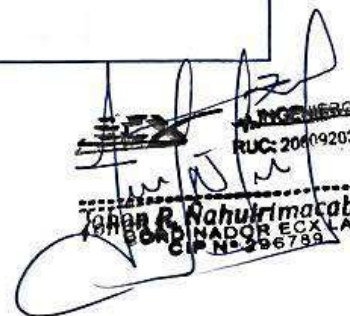

Juan R. Nahuirimacabeza
 COORDINADOR ECX LAB
 CIP N° 296789

Figura 28 — Curva granulométrica C-06.

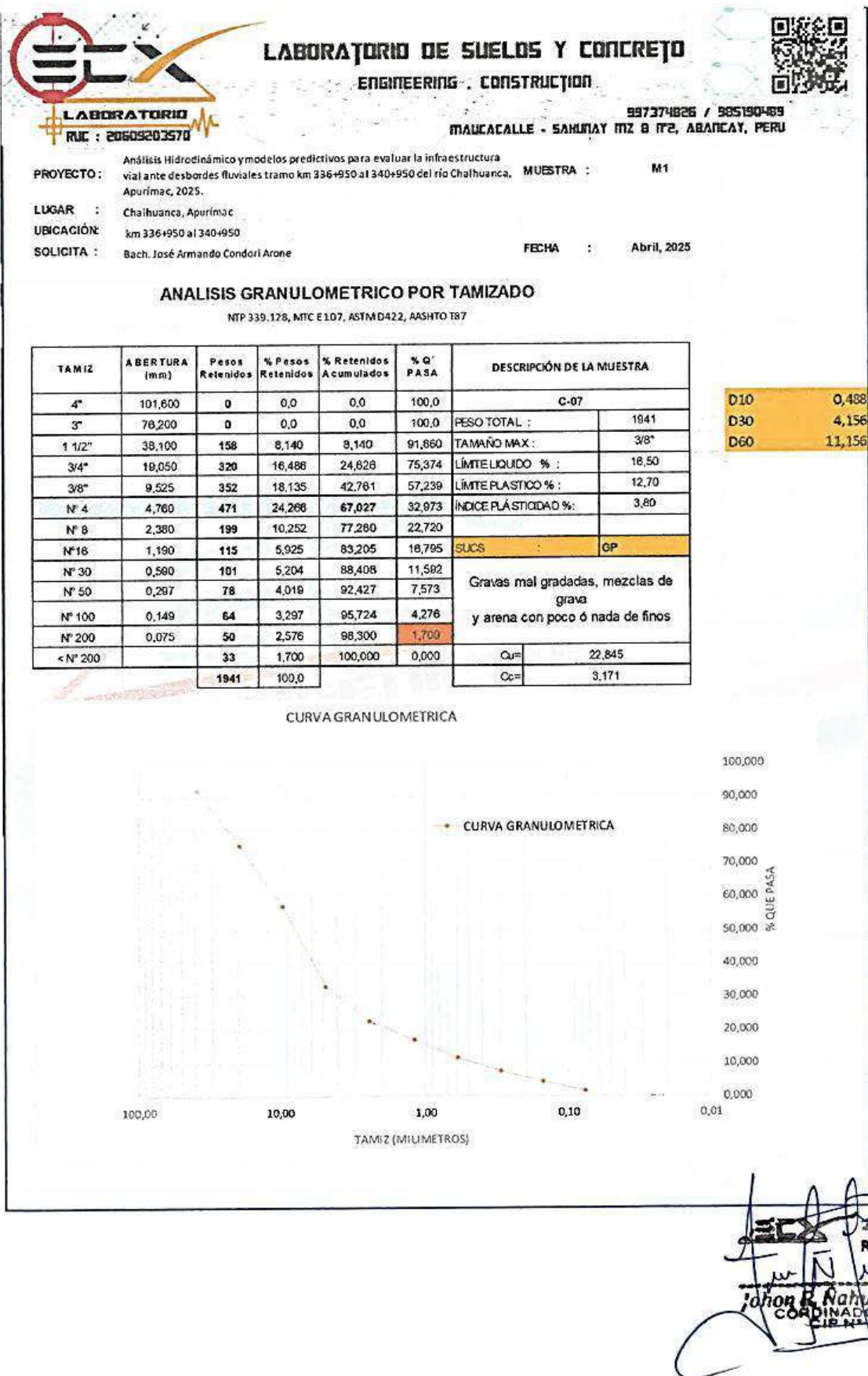


Figura 29 — Curva granulométrica C-07.

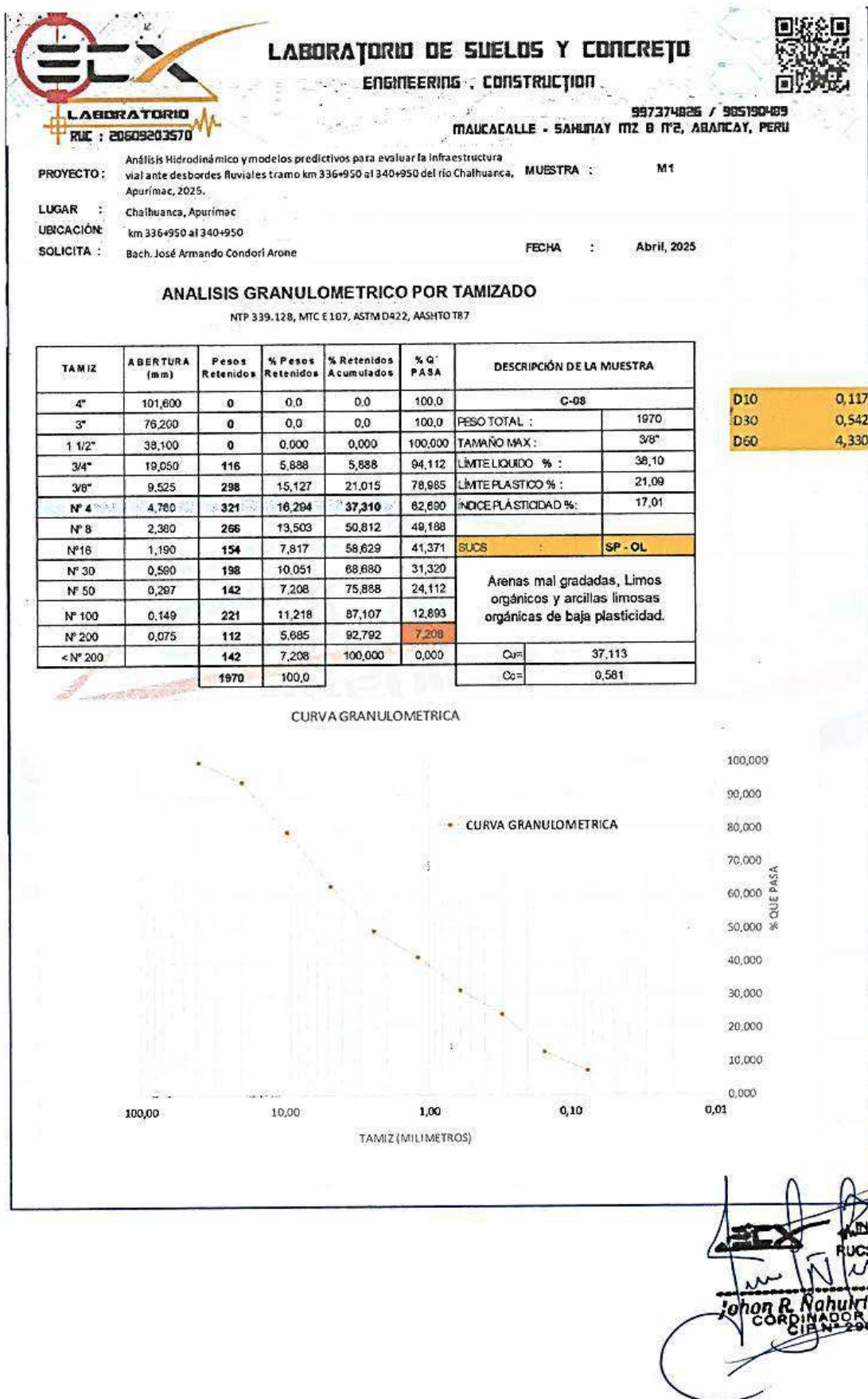


Figura 30 — Curva granulométrica C-08.

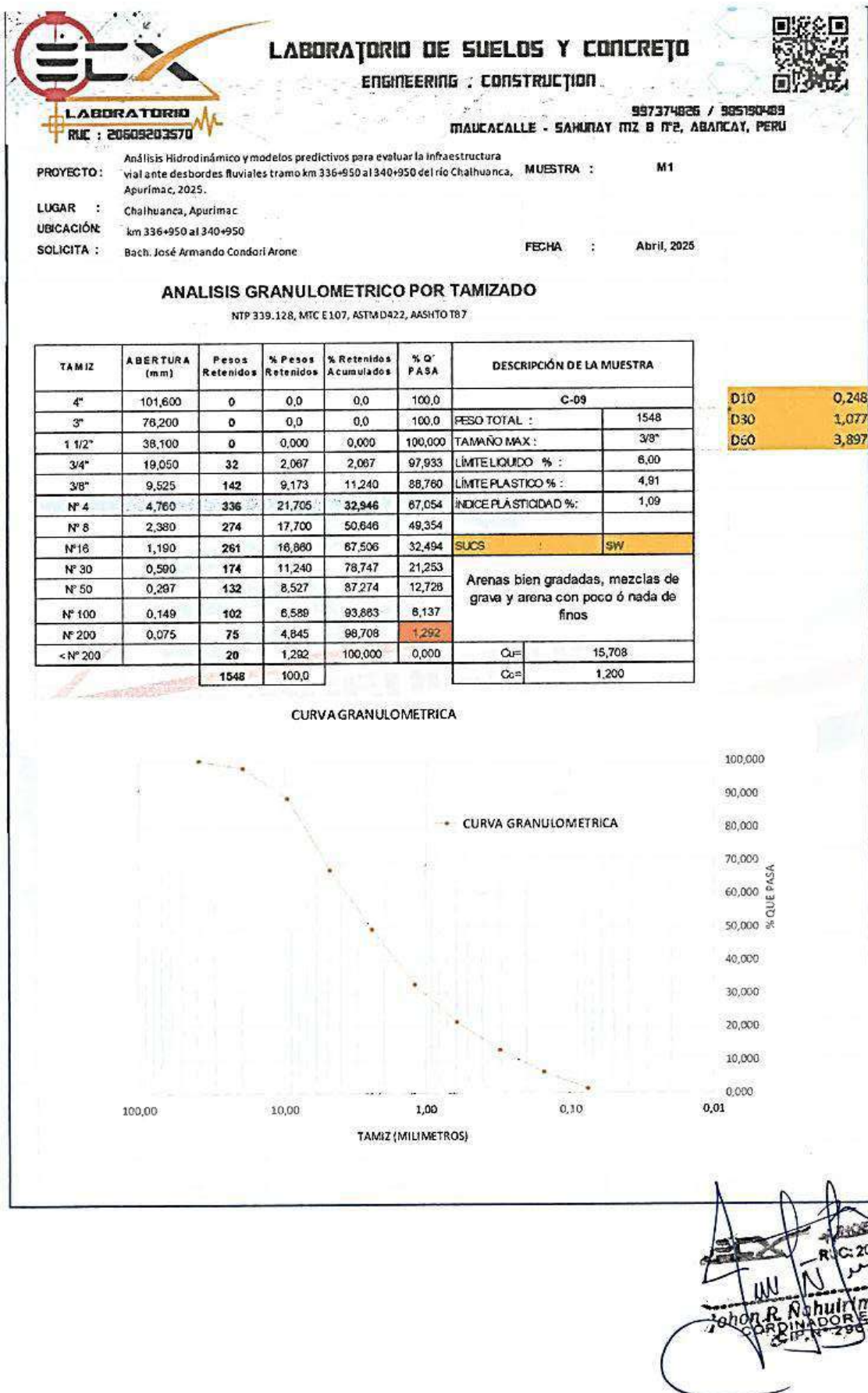


Figura 31 — Curva granulométrica C-09.

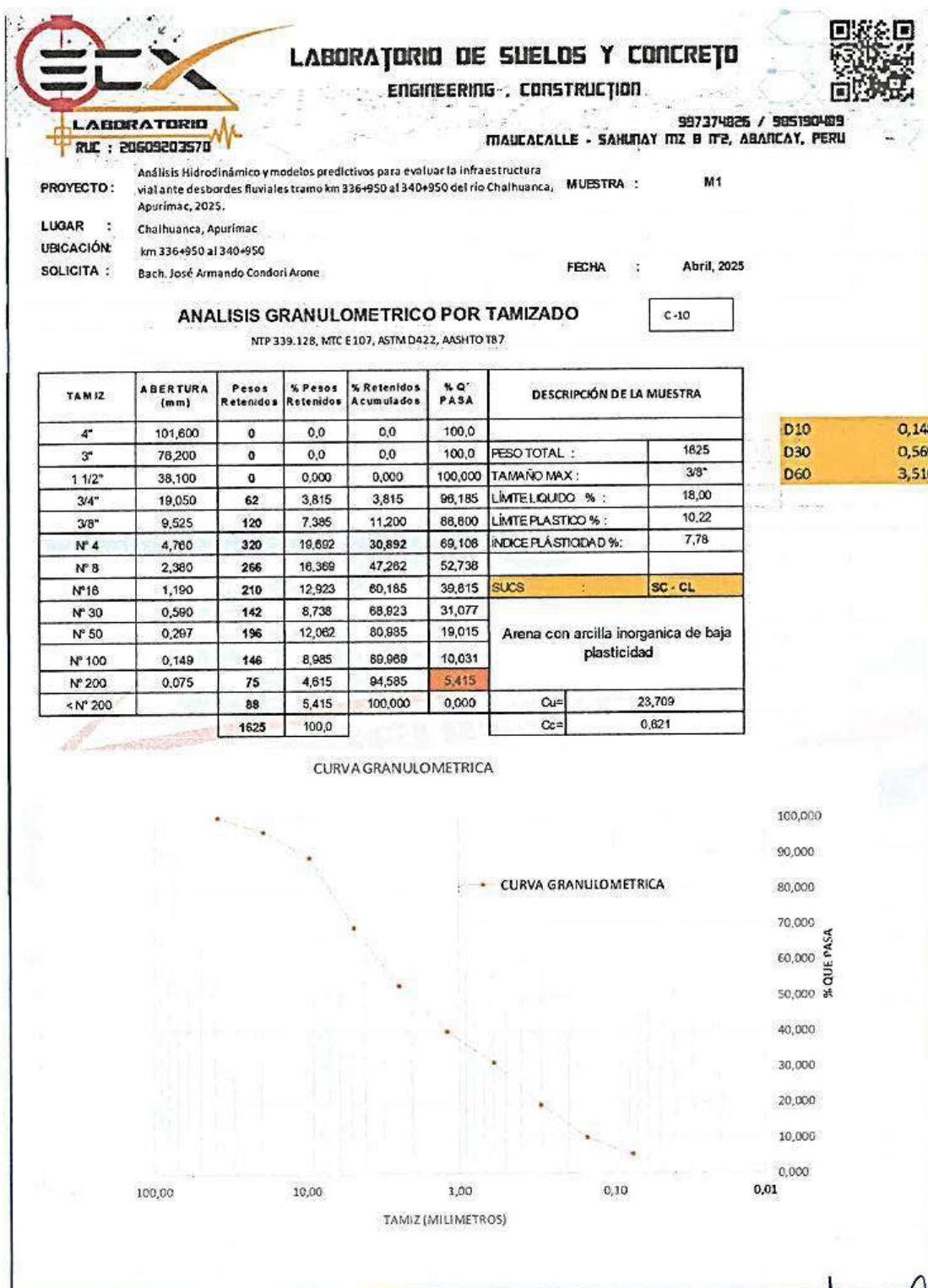


Figura 32 — Curva granulométrica C-10.

PROCEDIMIENTO PARA LA OBTENCION DE LOS DATOS A PARTIR DEL MODELADO

1. Descripción general de la investigación

La investigación se ejecutó mediante una combinación de análisis hidrodinámico del río Chalhuanca para determinar la vulnerabilidad de la infraestructura vial en el tramo Km 339+200 al 343+200 del río Chalhuanca, Apurímac. Se inició con la recopilación de datos históricos del caudal y las precipitaciones en la región, particularmente aquellos correspondientes a los eventos de desbordes ocurridos en enero de 2024. Esta información se usó para realizar simulaciones hidrodinámicas que modelaron el comportamiento del río bajo diversas condiciones de lluvia.

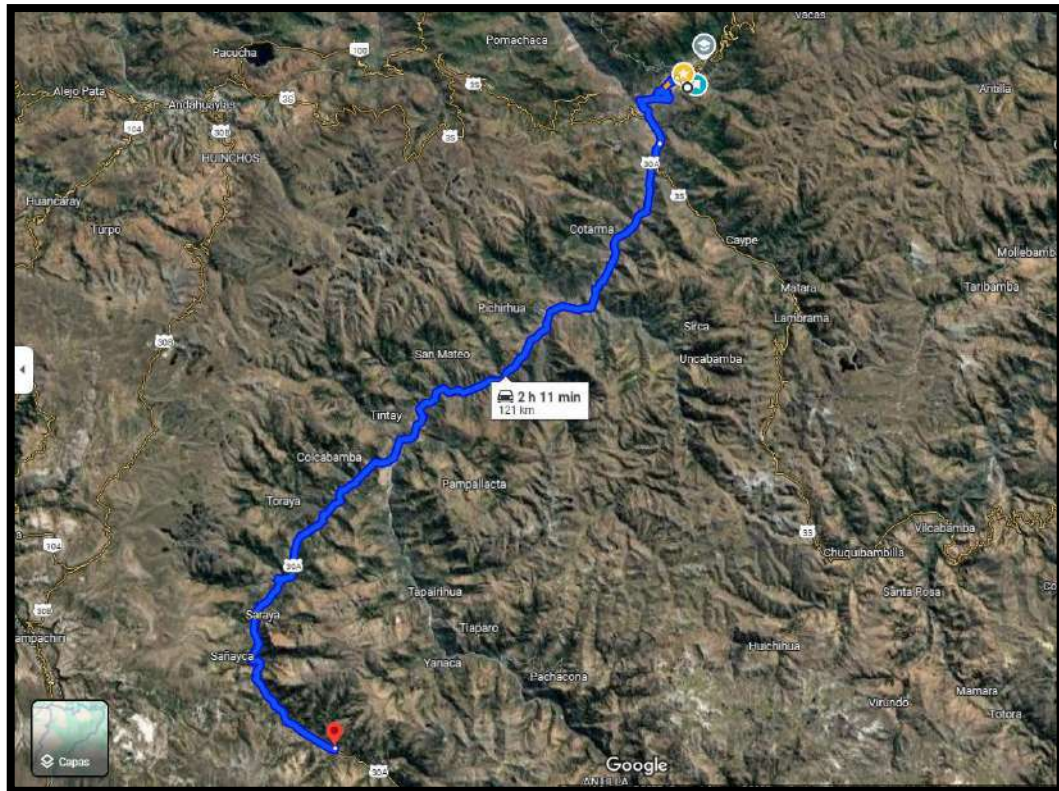
Los resultados de las simulaciones hidrodinámicas permitieron identificar las áreas de mayor vulnerabilidad a los desbordes y la erosión, particularmente en los márgenes del río, donde la infraestructura vial sufrió daños significativos. Se obtuvo información clave sobre los caudales máximos y las velocidades del flujo que afectan directamente la plataforma asfáltica de la carretera PE-30A.

En paralelo, se construyeron modelos predictivos basados en datos climáticos y las proyecciones del cambio climático para prever los posibles escenarios de desbordes en los próximos años. Estos modelos fueron validados utilizando los datos de los eventos previos, lo que permitió evaluar su precisión y confiabilidad.

Finalmente, los resultados obtenidos fueron comparados y analizados para determinar la vulnerabilidad de la infraestructura vial ante desbordes fluviales y las áreas más vulnerables mediante el análisis hidrodinámico. Se identificaron las zonas críticas que requieren intervención y se elaboraron recomendaciones para la protección de la infraestructura vial, con un enfoque en la planificación y gestión de riesgos.

Tabla 22 — Ruta de acceso al lugar de investigación

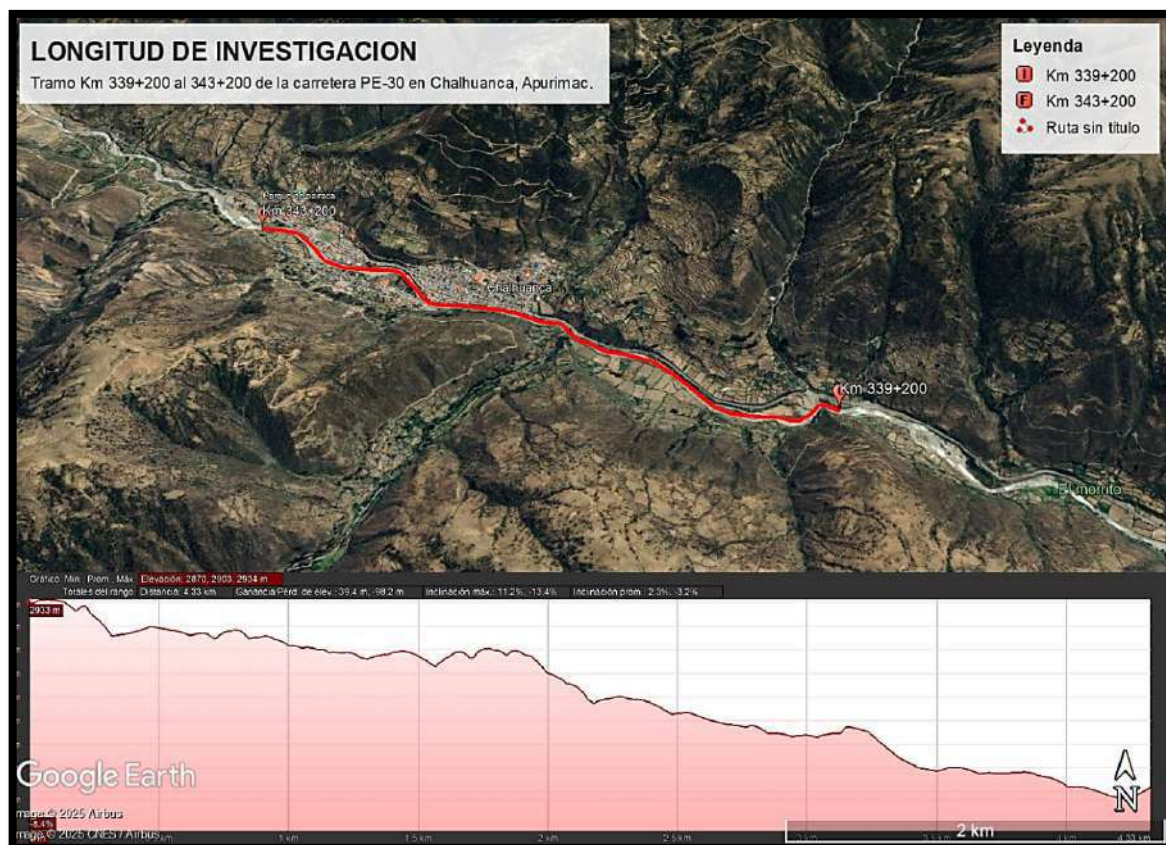
Desde	hasta	Longitud	Tiempo / Camioneta	Tipo de vía
Abancay, Abancay Apurímac	Chalhuanca, Aymares, *Apurímac	117 km	2h 5 min	Pavimentada



NOTA

La tabla muestra los detalles del tramo vial de acceso a la zona de estudio, que abarca el tramo Km 339+200 al 343+200 de la carretera PE-30A en Chalhuanca, Apurímac. Este tramo es crucial para la investigación sobre la vulnerabilidad de la infraestructura vial ante desbordes fluviales del río Chalhuanca y permite evaluar el impacto de los eventos climáticos extremos.

Figura 33 — Ruta de acceso al lugar de investigación



NOTA

La imagen muestra el tramo de la carretera PE-30A, específicamente entre los kilómetros 339+200 y 343+200 en la localidad de Chalhuanca, Apurímac. El mapa proporciona una visión general de la longitud de estudio, destacando el recorrido de la carretera que será objeto de investigación para el análisis hidrodinámico y la evaluación de la vulnerabilidad de la infraestructura vial ante desbordes fluviales del río Chalhuanca.

Además, la imagen incluye un perfil longitudinal del terreno a lo largo del tramo, mostrando variaciones en la pendiente y elevación, lo que es crucial para el análisis de los efectos de los desbordes y las inundaciones sobre la carretera. También se incluyen detalles técnicos como el tipo de pendiente, con un valor máximo de 18.1% y pendiente media de 2.5% a 3%, que son factores importantes para la evaluación de la estabilidad de la infraestructura vial frente a eventos climáticos extremos.

La información geoespacial proporcionada es clave para entender las características físicas de la zona y cómo la topografía puede influir en los riesgos de inundación y daño a la carretera en el tramo en cuestión.

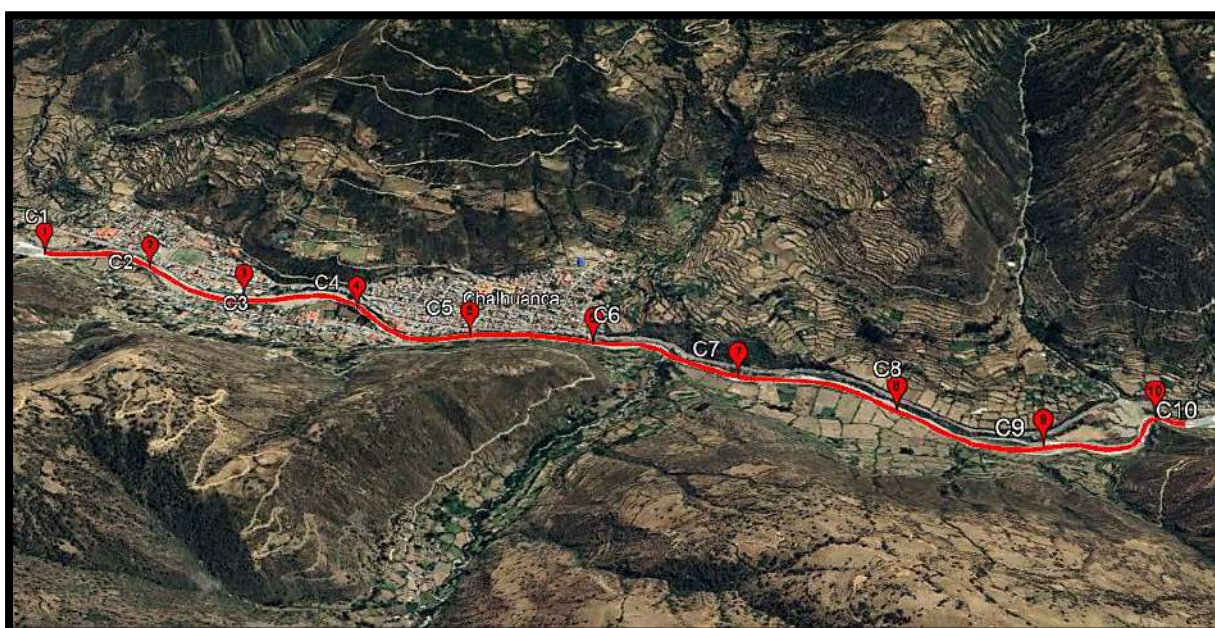
Figura 34 — Longitud de estudio

1.1 Análisis de los resultados de variable independiente: Análisis hidrodinámico.

1.1.1 Información de estudio y clasificación de suelos.

La exploración de campo en el tramo Km 339+200 al 343+200 de la carretera PE-30A en Chalhuanca, Apurímac, se llevó a cabo para obtener datos de primera mano sobre las condiciones actuales de la infraestructura vial y los posibles efectos de los desbordes fluviales del río Chalhuanca.

Se realizaron muestreos de los suelos y materiales presentes en la zona afectada para analizar su resistencia a la erosión y su capacidad de absorción de agua. Estos datos serán utilizados para alimentar los modelos hidrodinámicos y predecir el comportamiento del río ante futuros eventos climáticos.



NOTA:

El mapa muestra el tramo del río Chalhuanca, en Apurímac, comprendido entre los kilómetros 339+200 y 343+200, que será evaluado en el análisis hidrodinámico de la infraestructura vial. Los puntos de muestreo (C1 a C10) representan las ubicaciones estratégicas donde se han realizado estudios de suelo para determinar las condiciones hidrológicas y la posible afectación por desbordes fluviales. Este análisis es clave para la implementación de modelos predictivos que permitan anticipar y mitigar los riesgos de desbordes, asegurando la estabilidad y seguridad de las infraestructuras viales en la región.

Figura 35 — Longitud de estudio en el río Chalhuanca, 2025.

Tabla 23 — Coordenadas geográficas del muestreo del suelo.

CALICATA	ESTE	NORTE	COTA	TIPO MUESTRA	OBSERVACIÓN
C-01	687734,00	8419554,00	2910,00	Alterada	Dificultades para el muestreo
C-02	688131,00	8419390,00	2912,00	Alterada	
C-03	688475,00	8419146,00	2919,00	Alterada	Dificultades para el muestreo
C-04	688875,00	8418991.86	2925,00	Alterada	
C-05	689254,00	8418764,00	2932,00	Alterada	
C-06	689695,00	8418632,00	2940,00	Alterada	
C-07	690112,00	8418370,00	2942,00	Alterada	
C-08	690576,00	8418111,00	2948,00	Alterada	
C-09	690975,00	8417872,00	2957,00	Alterada	Dificultades para el muestreo
C-10	691386,00	8417941,00	2962,00	Alterada	

NOTA

La tabla presenta los resultados de las calicatas realizadas a lo largo del tramo Km 339+200 al 343+200 de la carretera PE-30A en Chalhuanca, Apurímac, como parte de la investigación sobre la vulnerabilidad de la infraestructura vial ante desbordes fluviales. Las calicatas fueron localizadas en diferentes puntos del área de estudio y registradas con sus coordenadas este (E), norte (N) y cota (altitud en metros sobre el nivel del mar). Todas las muestras obtenidas fueron catalogadas como "Alterada", lo que indica que los materiales fueron modificados debido a las condiciones del terreno o la intervención humana en la zona. Estas muestras son fundamentales para analizar la resistencia de los suelos y materiales presentes en el tramo vial afectado, lo cual es crucial para evaluar el riesgo de erosión y los posibles efectos de los desbordes fluviales en la carretera.

Tabla 24 — Análisis granulométrico

Identificación			Análisis Granulométrico				
Calicata	Muestra	Tipo	% Que Pasa La Malla N°				
N°	N°	Muestreo	N° 3/4	N° 4	N°16	N°100	N°200
C-01	E-01	Exploración	90,075	48,391	27,039	8,315	3,165
C-02	E-01	Exploración	94,990	65,504	38,174	10,019	3,805
C-03	E-01	Exploración	100,000	76,082	45,935	18,902	13,200
C-04	E-01	Exploración	94,214	61,716	39,923	11,716	5,931
C-05	E-01	Exploración	90,336	54,149	26,628	7,300	3,151
C-06	E-01	Exploración	84,252	40,551	24,522	5,681	1,462
C-07	E-01	Exploración	75,374	32,973	16,795	4,276	1,700
C-08	E-01	Exploración	94,112	62,690	41,371	12,893	7,208
C-09	E-01	Exploración	97,933	67,054	32,494	6,137	1,292
C-10	E-01	Exploración	96,185	69,108	39,815	10,031	5,415

NOTA

La tabla presenta los resultados del análisis granulométrico realizado en diversas calicatas a lo largo del tramo Km 339+200 al 343+200 de la carretera PE-30A en Chalhuanca, Apurímac. Cada calicata está identificada por su número y la muestra correspondiente es clasificada como Exploración. Los porcentajes indican el paso de cada muestra a través de diferentes mallas (N° 3/4, N° 4, N° 16, N° 100, N° 200), que reflejan el tamaño de las partículas del material obtenido en las calicatas.

Estos datos son clave para evaluar la composición granulométrica del suelo en la zona de estudio, lo que permitirá determinar su comportamiento ante condiciones de alta humedad o flujo de agua, factores relevantes para el análisis de la vulnerabilidad de la infraestructura vial frente a desbordes fluviales. Además, los porcentajes que pasan a través de las mallas ayudan a identificar la proporción de material fino y grueso en cada muestra, información

esencial para los modelos de erosión y simulaciones hidrodinámicas que se están llevando a cabo en la investigación.

Tabla 25 — Límites de atterberg y contenido de humedad

IDENTIFICACIÓN			Límites de Atterberg			Humedad
CALICATA	MUESTRA	TIPO	LL	LP	IP	
Nº	Nº		%	%	%	%
C-01	M1	Alterada	22,80	12,66	10,14	21,96%
C-02	M1	Alterada	20,20	16,06	4,14	18,23%
C-03	M1	Alterada	13,40	6,14	7,26	20,63%
C-04	M1	Alterada	36,70	17,01	19,69	15,97%
C-05	M1	Alterada	12,00	7,95	4,05	21,86%
C-06	M1	Alterada	5,40	4,64	0,76	22,17%
C-07	M1	Alterada	16,50	12,70	3,80	21,13%
C-08	M1	Alterada	38,10	21,09	17,01	24,28%
C-09	M1	Alterada	6,00	4,91	1,09	20,34%
C-10	M1	Alterada	18,00	10,22	7,78	16,00%

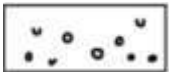
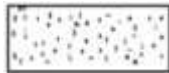
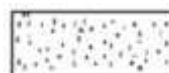
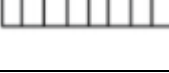
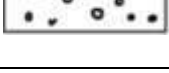
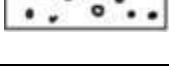
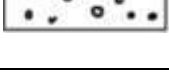
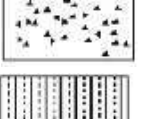
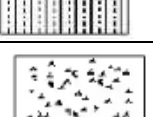
NOTA

La tabla presenta los resultados de los límites de Atterberg y el contenido de humedad de las muestras obtenidas en las calicatas a lo largo del tramo Km 339+200 al 343+200 de la carretera PE-30A en Chalhuanca. Los valores de los límites de Atterberg incluyen el límite líquido (LL), el límite plástico (LP) y el índice de plasticidad (IP), que son parámetros utilizados para clasificar suelos finos según su comportamiento ante variaciones de humedad.

Cada muestra está clasificada como Alterada, lo que indica que los suelos fueron modificados por las condiciones del terreno o la intervención humana. Los resultados del contenido de humedad (expresado en porcentaje) reflejan la cantidad de agua presente en las muestras de suelo, lo cual es esencial para evaluar las propiedades físicas del material en condiciones de saturación y su respuesta a fenómenos de erosión o desbordes fluviales. Estos datos son fundamentales para el análisis de la estabilidad de los suelos en el área de estudio y para la evaluación de su comportamiento ante las condiciones climáticas extremas, lo que ayudará a prever los posibles efectos en la infraestructura vial.



Tabla 26 — Clasificación de suelos

Calicat a	Muestra	Clasificación		Descripción	Símbolo	
		SUCS	AASHTO		SUCS	AASHTO
C-01	M1	GW	A-1-a	Gravas bien gradadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos		
C-02	M2	SP	A-3	Arenas mal gradadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos		
C-03	M3	SC	A -2 -6	Arenas arcillosas, mezclas de grava, arena y arcilla.		
C-04	M4	SP - OL	A-3 - A-5	Arenas mal gradadas, Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de media plasticidad.		
C-05	M5	SW	A-1-a	Arenas bien gradadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos		
C-06	M6	GW	A-1-a	Gravas bien gradadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos		
C-07	M7	GP	A-1-a	Gravas mal gradadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos		
C-08	M8	SP - OL	A-3 - A-5	Arenas mal gradadas, Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad.		
C-09	M9	SW	A-1-a	Arenas bien gradadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos		
C-10	M10	SC - CL	A -2 -6	Arena con arcilla inorgánica de baja plasticidad		

NOTA

La tabla presenta los resultados de la clasificación de suelos para las muestras obtenidas en las calicatas a lo largo del tramo Km 339+200 al 343+200 de la carretera PE-30A en Chalhuanca, Apurímac. Cada muestra está clasificada según los sistemas SUCS (Unified Soil Classification System) y AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials), con una descripción detallada del tipo de suelo encontrado.

Las clasificaciones incluyen tipos de suelos como Gravas bien gradadas, Arenas mal gradadas, Arenas con arcilla inorgánica y Limos orgánicos, con variaciones en la cantidad de finos presentes y su plasticidad. Esta clasificación es clave para entender el comportamiento de los suelos en términos de su capacidad de soportar la infraestructura vial y cómo pueden responder a fenómenos de desbordes fluviales, lo cual impacta en la estabilidad de la carretera en el área de estudio.

Tabla 27 — Coeficientes de rugosidad de manning

Material	Calidad Buena	Calidad Regular
Tierra, limpio de vegetación	0,016	0,018
Tierra, con hierba corta y pocas malezas	0,022	0,027
Suelo con alto contenido de grava, limpio	0,022	0,025
Tierra, sección irregular y muchas malezas	0,030	0,035
Tierra, con lados limpios de vegetación y fondo de grava	0,025	0,030
Tierra, con lados limpios de vegetación y fondo de cantos rodados	0,030	0,035
Roca lisa y con pocas irregularidades	0,035	0,040
Roca dentada y con muchas irregularidades	0,040	0,045
Canales sin mantenimiento con maleza densa de la misma altura del agua o mayor	0,080	0,120
Canales sin mantenimiento con fondo limpio y rastrojo y matorrales en los lados. Gastos Altos	0,050	0,080
Canales sin mantenimiento con fondo limpio y rastrojo y matorrales en los lados. Gastos Bajos	0,070	0,110

FUENTE — BOLINAGA J.J , 1999

Tabla 28 — Coeficientes de rugosidad de Manning - Iber

Nro.	Class_Names	Manning
1	Rio	0,025
2	Pista	0,1
3	tierra labrada	0,04
4	Praderas	0,035
5	áreas de construcción	0,04
6	arenales o roquedales	0,025
7	bosque	0,12
8	infraestructura	0,02
9	Infraestructura de transporte	0,1
10	Pastizal natural	0,035
11	arena, arcilla	0,023

NOTA

La tabla muestra los **coeficientes de rugosidad de Manning** para diferentes superficies utilizadas en el modelado hidrodinámico con IBER. Estos coeficientes representan la resistencia al flujo de agua sobre diversas superficies, donde valores más bajos indican menor resistencia, como en el caso del río (0,025), y valores más altos corresponden a superficies con mayor fricción, como el bosque (0,12). Estos valores son cruciales para calcular la velocidad y el comportamiento del flujo de agua en simulaciones hidrodinámicas.

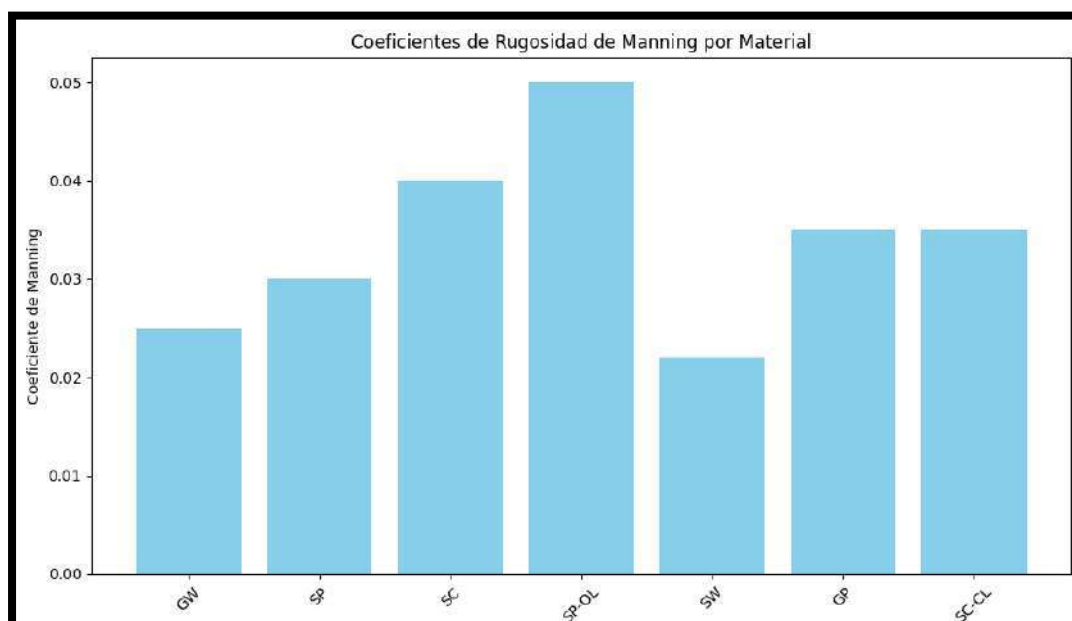
La **rugosidad de Manning** es un factor utilizado para estimar la resistencia que el flujo de agua experimenta al pasar por diferentes tipos de superficies. Cuanto mayor sea el valor de este coeficiente, mayor será la resistencia al flujo.

FUENTE — IBER

Tabla 29 — Clasificación de suelos y coeficientes de rugosidad

Exploración	Muestra	Clasificación		Descripción	Coeficientes de rugosidad de manning
		SUCS	AASHTO		
E-01	M1	GW	A-1-a	Gravas bien gradadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos	0.025
E-02	M2	SP	A-3	Arenas mal gradadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos	0.03
E-03	M3	SC	A -2 -6	Arenas arcillosas, mezclas de grava, arena y arcilla.	0.04
E-04	M4	SP - OL	A-3 - A-5	Arenas mal gradadas, Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de media plasticidad.	0.05
E-05	M5	SW	A-1-a	Arenas bien gradadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos	0.022
E-06	M6	GW	A-1-a	Gravas bien gradadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos	0.025
E-07	M7	GP	A-1-a	Gravas mal gradadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos	0.035
E-08	M8	SP - OL	A-3 - A-5	Arenas mal gradadas, Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad.	0.05
E-09	M9	SW	A-1-a	Arenas bien gradadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos	0.022
E-10	M10	SC - CL	A -2 -6	Arena con arcilla inorgánica de baja plasticidad	0.035

La tabla muestra las muestras de suelo clasificadas según los sistemas SUCS y AASTHO, junto con sus coeficientes de rugosidad de Manning. Estos coeficientes, que varían entre 0.022 y 0.05, indican la resistencia al flujo de agua en diferentes tipos de suelos. Los suelos con menor rugosidad, como gravas y arenas bien gradadas (coeficiente 0.022), permiten un flujo más libre, mientras que los suelos con mayor contenido de arcilla o limos, como las arenas arcillosas y las mezclas con limos orgánicos (coeficiente 0.05), ofrecen mayor resistencia al flujo de agua.



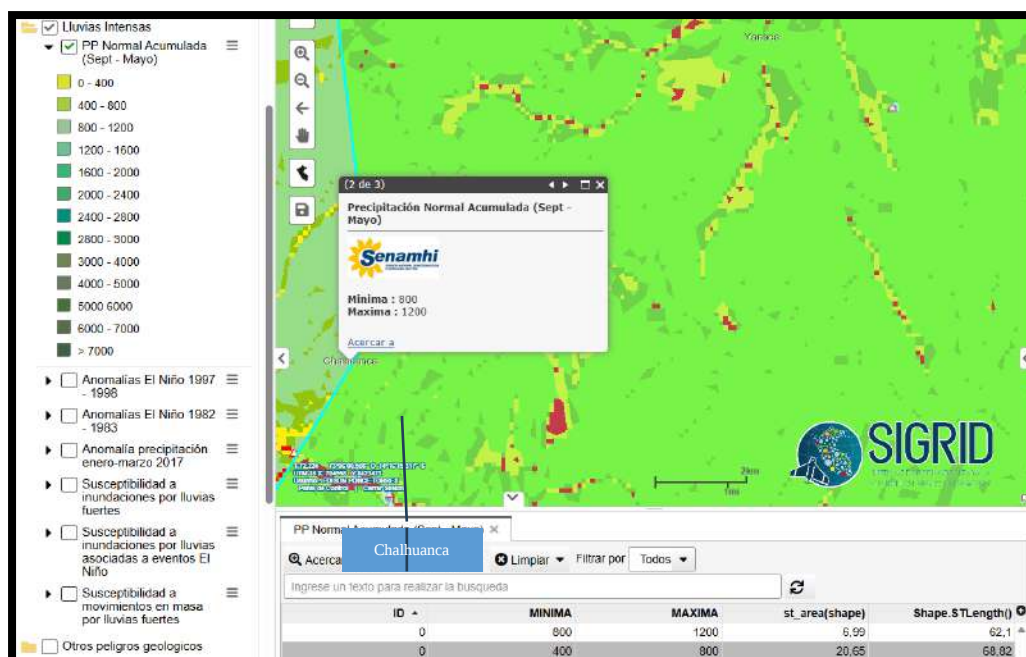
NOTA

El gráfico muestra los coeficientes de rugosidad de Manning para distintos materiales, clasificados como GW, SP, SC, SP-OL, SW, GP, y SC-CL. El material SP-OL tiene el coeficiente más alto (alrededor de 0.05), indicando una mayor resistencia al flujo de agua. Los demás materiales, como GW y SW, presentan coeficientes más bajos (alrededor de 0.02-0.03), lo que indica una menor resistencia al flujo. Esto refleja la variabilidad de la rugosidad de los materiales, que afecta la facilidad con que el agua fluye a través de ellos.

Figura 36 — Coeficiente de rugosidad de Manning por material.

1.1.1.1 Hidrología

Las precipitaciones más comunes ocurren entre Setiembre y mayo. En términos generales, las precipitaciones acumuladas superan los 800 mm a 1200 mm anuales, abarcando principalmente los meses de septiembre a mayo.

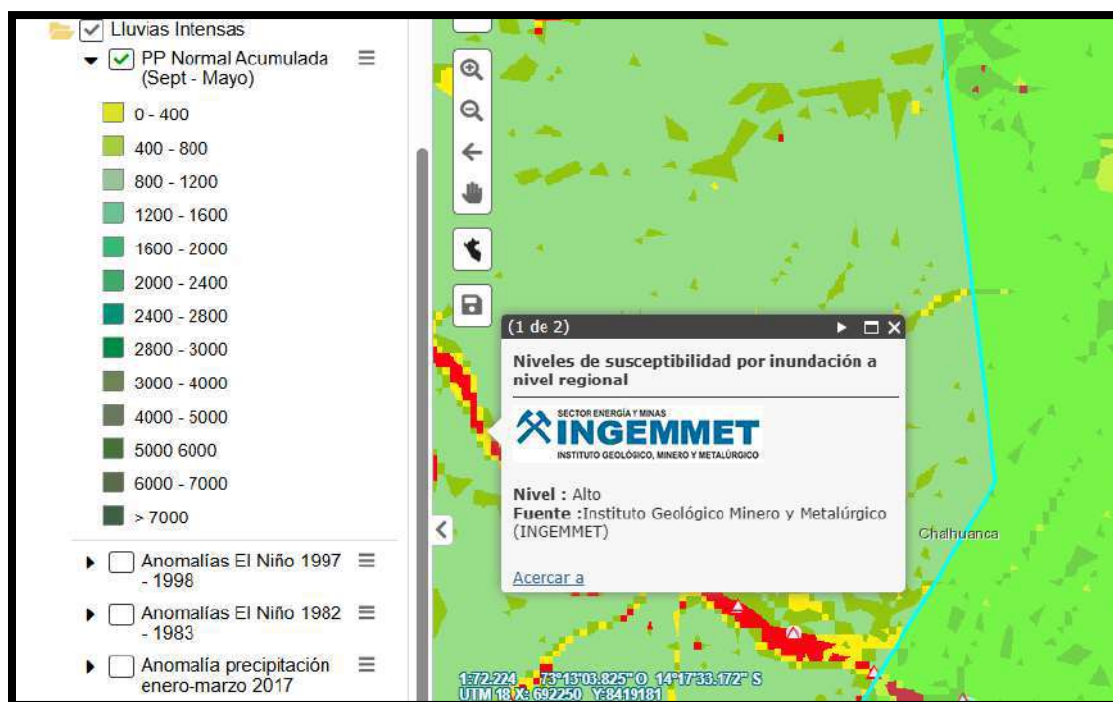


NOTA

La precipitación normal acumulada en el mapa muestra un rango de lluvias entre 800 mm y 1200 mm durante el periodo de septiembre a mayo, lo cual puede indicar que la región experimenta lluvias considerables en esa franja de tiempo, lo que podría afectar la infraestructura vial en términos de inundaciones o desbordes.

El análisis hidrodinámico debería considerar estos valores de precipitación como base para simular el impacto de las lluvias en el caudal del río y en la capacidad de los sistemas de drenaje en el tramo que estás estudiando.

Figura 37 — Precipitación normal acumulada

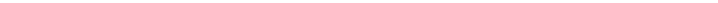


NOTA

Mapa de niveles de susceptibilidad por inundación en el tramo del río Chalhuanca, Apurímac, proporcionado por el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET). El mapa muestra áreas con un nivel de susceptibilidad alto, lo que es fundamental para el análisis hidrodinámico y la evaluación de riesgos de desbordes fluviales que afectan la infraestructura vial en la región.

Figura 38 — Niveles de susceptibilidad por inundación

Para el área de estudio, se ha evaluado la precipitación máxima en 24 horas (P24) de cuatro estaciones pluviométricas cercanas a la zona en cuestión. En este análisis, se calculará la precipitación máxima en 24 horas para un periodo de 100 años, dado que es este valor el que podría generar una inundación en el río Chalhuanca. Según el PROCEDIMIENTO N° 08, el ANA recomienda realizar un Análisis Hidrológico y calcular los caudales máximos de diseño para tiempos de retorno de 100 años en áreas urbanas o 50 años en áreas rurales. Dado que se trata de una zona con un punto crítico identificado, se ha determinado un periodo de retorno de 100 años. Debido a la falta de un registro completo de precipitaciones máximas de las cuatro estaciones meteorológicas (Chalhuanca, Paucaray, Andahuaylas y Abancay), se procederá a regionalizar las precipitaciones máximas en 24 horas para el área de influencia del proyecto de investigación.

N°	ESTACIÓN	REGISTRO PRECIPITACIONES MÁXIMAS EN 24 HORAS																			
		ALTITUD (msnm)	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
1	CHALHUANCA	3358																			
2	PAUCARAY	3238																			
3	ANDAHUAYLAS	2865																			
4	ABANCAY	2776																			

NOTA

Al contar con información precisa de precipitación en los años disponibles, podemos modelar de manera más efectiva el impacto de las lluvias, especialmente en los tramos críticos del río Chalhuanca, para realizar predicciones más confiables y tomar decisiones informadas.

Figura 39 — Registro precipitaciones máximas en 24 horas

Tabla 30 — Datos de precipitación máxima en 24 horas según el SENAMHI.

1. CHALHUANCA		2. PAUCARAY		3. ANDAHUAYLAS		4. ABANCAY	
P.max24hr	Año	P.max24hr	Año	P.max24hr	Año	P.max24hr	Año
SD	1998	SD	1998	S/D	1998	24,9	1998
SD	1999	SD	1999	S/D	1999	40,2	1999
28,2	2000	SD	2000	S/D	2000	27,3	2000
41,7	2001	SD	2001	S/D	2001	27,4	2001
29,6	2002	28,6	2002	24,8	2002	24,0	2002
34,1	2003	27,1	2003	25,7	2003	43,7	2003
41,0	2004	25,1	2004	19,9	2004	28,6	2004
28,0	2005	S/D	2005	35,3	2005	30,6	2005
49,4	2006	27,9	2006	43,3	2006	24,6	2006
38,6	2007	31,9	2007	29,2	2007	32,1	2007
50,6	2008	27,8	2008	23,5	2008	34,9	2008
25,5	2009	36,2	2009	22,2	2009	35,3	2009
39,5	2010	21,7	2010	36,3	2010	43,3	2010
31,0	2011	39,2	2011	28,1	2011	29,2	2011
30,4	2012	38,2	2012	29,3	2012	25,5	2012
34,8	2013	27,2	2013	40,2	2013	28,5	2013
40,0	2014	22,3	2014	31,3	2014	36,3	2014
37,4	2015	24,5	2015	19,9	2015	38,1	2015
39,5	2016	23,6	2016	30,8	2016	39,3	2016
41,5	2017	25,6	2017	31,8	2017	40,2	2017

NOTA

La Tabla presenta los datos de precipitación máxima en 24 horas para las estaciones Chalhuanca, Paucaray, Andahuaylas y Abancay desde 1998 hasta 2017. Los valores reflejan las precipitaciones máximas registradas en cada año, con algunas celdas indicando datos faltantes (S/D). Estos datos son fundamentales para el análisis hidrodinámico y los modelos predictivos, ya que permiten evaluar el impacto de las precipitaciones, especialmente en zonas propensas a desbordes fluviales.

Tabla 31 — Distancia de estaciones al lugar del proyecto W1

Estación (360)	Distancia (km)
Chalhuanca	14,87
Paucaray	49,66
Andahuaylas	70,15
Abancay	83,62

NOTA

La Tabla presenta las distancias en kilómetros entre las estaciones de medición y el lugar del Proyecto W1. Se observa que la estación Chalhuanca está a 14,87 km, la estación Paucaray a 49,66 km, la estación Andahuaylas a 70,15 km y la estación Abancay a 83,62 km. Estas distancias son cruciales para la estimación de la precipitación máxima en 24 horas utilizando el método de Cuadrado de la Distancia Inversa (IDW), ya que las estaciones más cercanas tienen mayor peso en los cálculos de interpolación.

Tabla 32 — Datos de precipitación máxima en 24 horas completadas

AÑO	ESTACIONES				Para completar y regionalizar la serie se utiliza la metodología Cuadrado de la Distancia Inversa (IDW)			
	CHALHUANCA	PAUCARAY	ANDAHUAYLAS	ABANCAY	W1	W2	W3	W4
1998	SD	SD	S/D	24,9	25,10	25,10	25,10	24,90
1999	SD	SD	S/D	40,2	40,40	29,24	29,85	40,20
2000	28,2	SD	S/D	27,3	28,20	35,33	35,13	27,30
2001	41,7	SD	S/D	27,4	41,70	39,76	39,58	27,40
2002	29,6	28,6	24,8	24	29,70	29,72	29,77	24,00
2003	34,1	27,1	25,7	43,7	34,12	34,19	34,27	43,70
2004	41	25,1	19,9	28,6	37,21	38,25	38,59	28,60
2005	28	S/D	35,3	30,6	31,62	30,73	30,54	30,60
2006	49,4	27,9	43,3	24,6	47,04	47,63	47,77	24,60

2007	38,6	31,9	29,2	32,1	36,15	36,79	36,96	32,10
2008	50,6	27,8	23,5	34,9	44,40	46,04	46,52	34,90
2009	25,5	36,2	22,2	35,3	28,62	27,94	27,86	35,30
2010	39,5	21,7	36,3	43,3	39,28	39,36	39,40	43,30
2011	31	39,2	28,1	29,2	30,95	30,98	31,01	29,20
2012	30,4	38,2	29,3	25,5	31,33	31,13	31,11	25,50
2013	34,8	27,2	40,2	28,5	35,07	34,96	34,90	28,50
2014	40	22,3	31,3	36,3	38,57	38,97	39,11	36,30
2015	37,4	24,5	19,9	38,1	34,46	35,28	35,55	38,10
2016	39,5	23,6	30,8	39,3	30,69	30,68	30,68	39,30
2017	41,5	25,6	31,8	40,2	32,06	32,07	32,09	40,20

NOTA

La Tabla presenta los datos de precipitación máxima en 24 horas para las estaciones Chalhuanca, Paucaray, Andahuaylas y Abancay, así como los valores estimados para las estaciones W1, W2, W3 y W4. Para completar y regionalizar las series de datos faltantes, se utilizó la metodología de Cuadrado de la Distancia Inversa (IDW). Esta técnica de interpolación permitió estimar los valores de precipitación en los años con datos ausentes, basándose en la información de las estaciones cercanas, ajustando el peso de cada estación en función de su distancia al punto de interés.

Tabla 33 — Valores de Ko para la prueba de datos atípicos

Tamaño de muestra	Ko	Tamaño de muestra	Ko	Tamaño de muestra	Ko	Tamaño de muestra	Ko
10	2.036	24	2.467	38	2.661	60	2.837
11	2.088	25	2.486	39	2.671	65	2.866
12	2.134	26	2.502	40	2.682	70	2.893
13	2.175	27	2.519	41	2.692	75	2.917
14	2.213	28	2.534	42	2.700	80	2.940
15	2.247	29	2.549	43	2.710	85	2.961
16	2.279	30	2.563	44	2.719	90	2.981
17	2.309	31	2.577	45	2.727	95	3.000
18	2.335	32	2.591	46	2.736	100	3.017
19	2.361	33	2.604	47	2.744	110	3.049
20	2.385	34	2.616	48	2.753	120	3.078
21	2.408	35	2.628	49	2.760	130	3.104
22	2.429	36	2.639	50	2.768	140	3.129
23	2.448	37	2.650	55	2.804		

FUENTE — VEN TE CHOW

NOTA

La **Tabla** presenta los **valores de Ko** correspondientes a la **prueba de datos atípicos** según el tamaño de muestra. Estos valores se utilizan en la estadística para identificar puntos de datos que se desvían significativamente de la tendencia general de los datos. Los valores de Ko varían según el tamaño de la muestra, y su aplicación es esencial para detectar y manejar **datos atípicos** en el análisis estadístico. Los valores indicados en la tabla están tomados de **Ven te Chow**.

Tabla 34 — Datos atípicos de la estación de estudio

N	Año	W1 - CHALHUANCA		
		Pmáx24h	Ln Max	Condición $Y_i < L_n < Y_s$
1	1998	25,10	3,22	Verificado
2	1999	40,40	3,70	Verificado
3	2000	28,20	3,34	Verificado
4	2001	41,70	3,73	Verificado
5	2002	29,70	3,39	Verificado
6	2003	34,12	3,53	Verificado
7	2004	37,21	3,62	Verificado
8	2005	31,62	3,45	Verificado
9	2006	47,04	3,85	Verificado
10	2007	36,15	3,59	Verificado
11	2008	44,40	3,79	Verificado
12	2009	28,62	3,35	Verificado
13	2010	39,28	3,67	Verificado
14	2011	30,95	3,43	Verificado
15	2012	31,33	3,44	Verificado
16	2013	35,07	3,56	Verificado
17	2014	38,57	3,65	Verificado
18	2015	34,46	3,54	Verificado
19	2016	30,69	3,42	Verificado
20	2017	32,06	3,47	Verificado
		Media Ln	3,53	
		Desvió Ln	0,16	
		Ko	2,385	
		Lim Superior	3,85	
		Lim Inferior	3,22	

NOTA

Los datos de precipitación máxima en 24 horas de la estación Chalhuanca se encuentran dentro del rango esperado, lo cual es un indicio de que los datos son coherentes y fiables para su utilización en el análisis hidrológico. Todos los valores de $\ln$ (logaritmo natural de $P_{\text{máx}24h}$) están perfectamente alineados dentro de los límites superiores e inferiores establecidos, basados en la prueba estadística con el valor de $K_o=2.385$. Esto significa que ninguno de los datos registrados es atípico o anómalo, lo cual es crucial para la calidad de la información.

La verificación de que los datos son verificados y que no existen valores atípicos refuerza la confiabilidad de la serie temporal y asegura que las predicciones y modelos basados en estos valores serán precisos y representativos de la realidad.

En resumen, la calidad de los datos de Chalhuanca asegura que los análisis realizados para prever posibles inundaciones, evaluar el impacto de las precipitaciones en infraestructuras viales, y desarrollar estrategias de mitigación sean basados en información confiable.

Tabla 35 — Periodos de retorno

Periodo Retorno (años)	P (probabilidad)	1-P	PP (mm)	PP(mm)X1.13
25	0,03	0,97	42,26	46,88
50	0,02	0,98	48,98	56,53
100	0,01	0,99	56,66	60,38
200	0,006	0,994	59,8	65,46
500	0,003	0,997	64,77	72,88

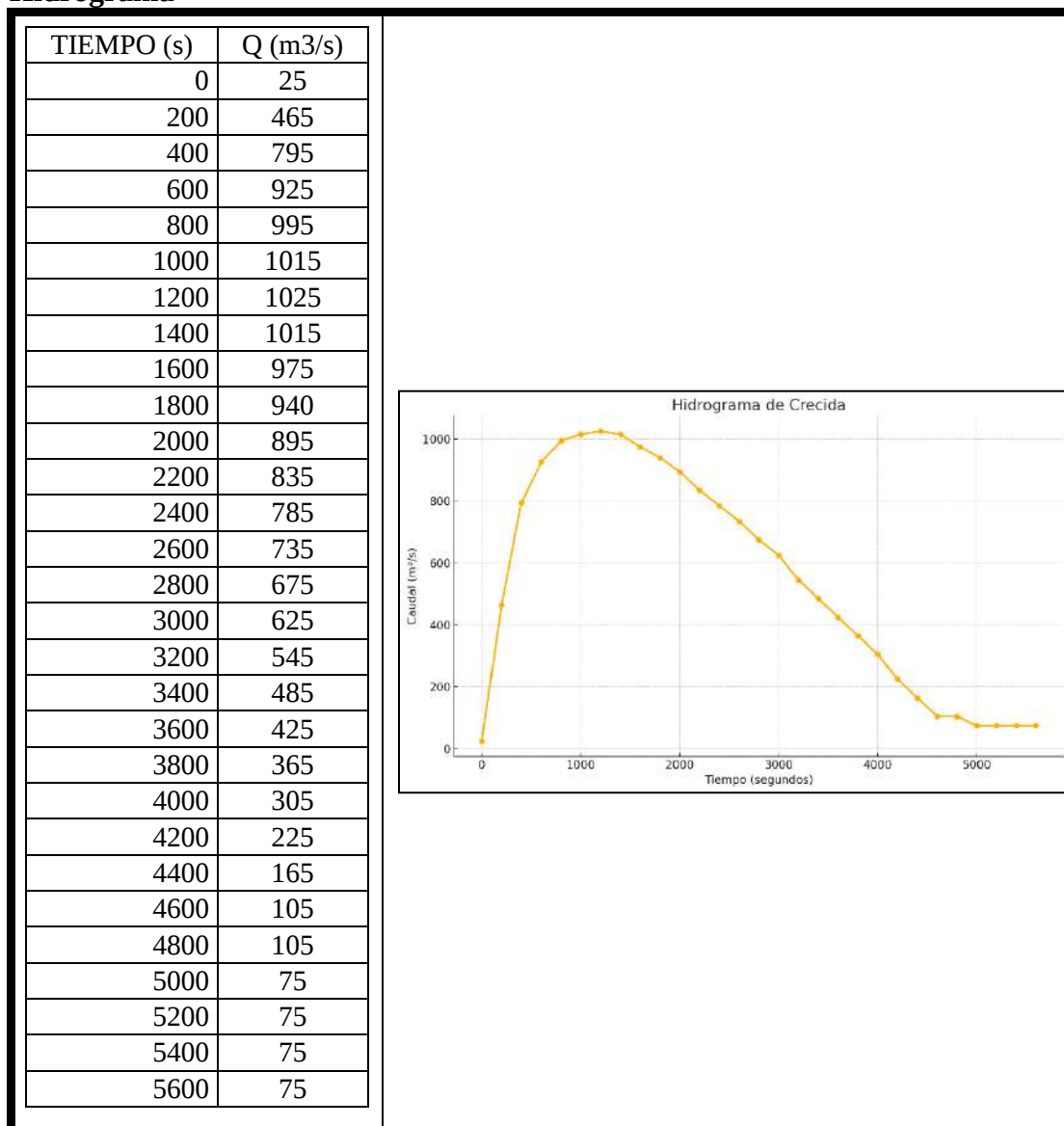
NOTA

La tabla muestra la **precipitación máxima en 24 horas** para diferentes **períodos de retorno**, que es esencial para evaluar el comportamiento de las precipitaciones extremas durante diferentes intervalos de tiempo.

1. **Periodo de Retorno (años):** Indica el intervalo temporal durante el cual se espera que ocurra un evento de precipitación con una determinada intensidad.
2. **P (probabilidad):** Es la probabilidad anual de que el evento de precipitación ocurra en un año determinado, dada la duración del periodo de retorno. A mayor período de retorno, menor es la probabilidad de que ocurra el evento.
3. **1-P:** Representa la probabilidad de que el evento no ocurra en un año determinado. Es decir, la **probabilidad de que el evento no suceda**.

4. **PP (mm):** Es la **precipitación máxima ajustada** calculada para los diferentes periodos de retorno. Esta es la cantidad de lluvia que se espera en un período de 24 horas durante el evento más extremo de acuerdo al período de retorno.
5. **PP (mm) X 1.13:** Es la **precipitación ajustada** multiplicada por el **factor de corrección** de **1.13**. Este factor se aplica para ajustar las precipitaciones en función de los sesgos de subestimación por mediciones tomadas a intervalos fijos de 24 horas.

▪ **Hidrograma**



NOTA

La tabla presenta la evolución del caudal (Q) en función del tiempo, registrada en intervalos de 200 segundos, como parte del análisis hidrodinámico del tramo comprendido entre el km 339+200 al km 343+200 del río Chalhuanca. Se observa un aumento progresivo del caudal desde un valor base de 25 m³/s hasta alcanzar un pico máximo de 1025 m³/s a los 1200 segundos, lo cual indica una rápida respuesta de la

cuenca ante un evento de lluvia intensa. Posteriormente, el caudal desciende gradualmente, evidenciando la fase de recesión del hidrograma.

Este comportamiento es característico de una cuenca con escasa capacidad de infiltración inicial y pendiente relativamente pronunciada, lo que favorece una rápida concentración de escorrentía superficial. El análisis de esta tabla permite identificar los momentos críticos para el diseño de obras hidráulicas y la evaluación del riesgo de inundaciones en la zona de estudio.

Figura 40 — Hidrograma de crecida.

1.1.1.2 Perfil hidráulico

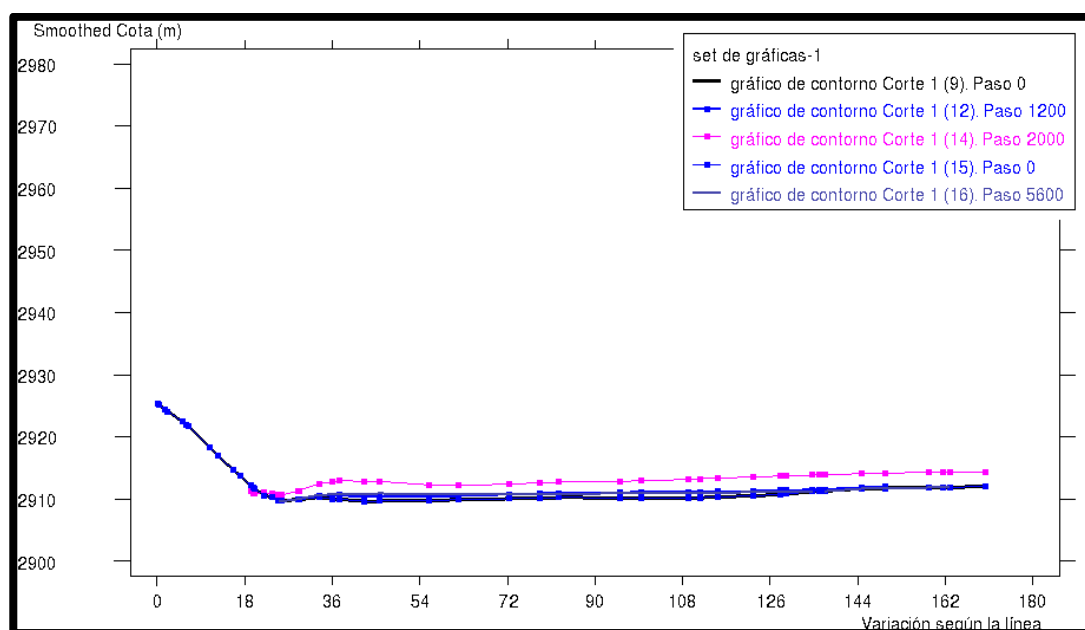
El perfil hidráulico es clave para entender cómo el río se comportará en situaciones de crecidas o desbordes. Al integrar los datos de cota y profundidad obtenidos en el tramo de estudio, podemos identificar zonas de riesgo de inundación para las infraestructuras viales cercanas. Además, el perfil hidráulico ayuda a predecir las velocidades de flujo, lo que es esencial para evaluar el impacto de las crecidas en las infraestructuras viales y tomar decisiones sobre posibles medidas de protección y mitigación.

En conclusión, el perfil hidráulico permite visualizar cómo el flujo de agua varía a lo largo del tramo, lo que facilita el análisis de la vulnerabilidad de la infraestructura vial y la identificación de áreas críticas donde las crecidas pueden generar mayores impactos. Esto es fundamental para la planificación de obras de mitigación y la optimización del diseño de la infraestructura en zonas propensas a desbordes fluviales.

Magnitudes que se obtienen del Perfil Hidráulico

1. Profundidad del agua:
 - Unidad: metros (m)
 - Descripción: Distancia vertical desde la superficie del agua hasta el lecho del río.
2. Pendiente hidráulica:
 - Unidad: adimensional
 - Descripción: Relación entre la diferencia de alturas y la distancia horizontal, representa la inclinación de la superficie del agua a lo largo del cauce.
3. Velocidad del flujo:
 - Unidad: metros por segundo (m/s)
 - Descripción: Rapidez con que el agua se desplaza dentro del cauce.

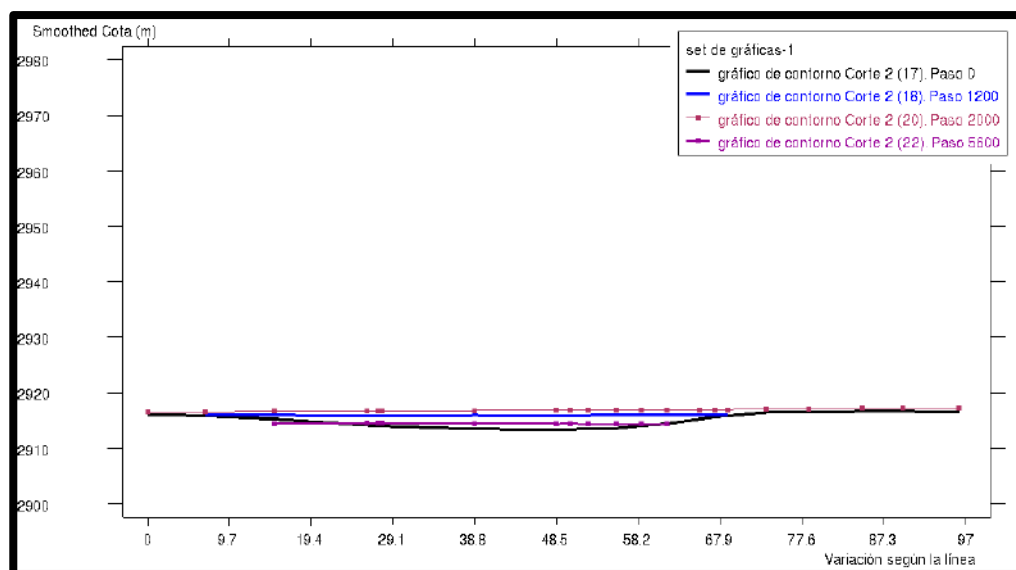
4. Caudal (volumen de agua por tiempo):
 - Unidad: metros cúbicos por segundo (m^3/s)
 - Descripción: Volumen de agua que pasa por una sección transversal por unidad de tiempo.
5. Energía hidráulica o carga hidráulica:
 - Unidad: metros (m)
 - Descripción: Energía por unidad de peso del agua, que incluye la altura, presión y la velocidad del flujo.



NOTA

El corte 1 evidencia una depresión inicial en la cota suavizada entre los metros 0 y 20, seguida de una estabilización en cotas para los pasos de simulación 0, 1200, 2000 y 5600. Esta configuración indica una zona de acumulación o retención superficial de agua, con un comportamiento hidráulico estable en el tramo posterior. La diferencia entre las curvas sugiere variaciones espaciales en la carga hidráulica que podrían influir en la saturación del suelo y potencial riesgo de erosión.

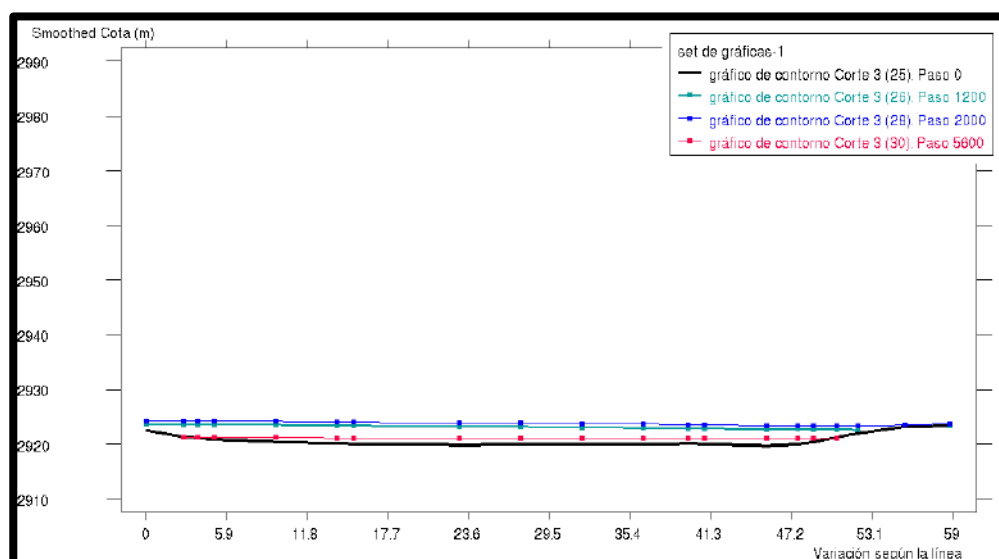
Figura 41 — Perfil hidrodinámico PH-1 en diferentes pasos temporales



NOTA

La depresión central en el corte 2, junto con diferencias en cotas a lo largo de la simulación, reflejan una dinámica hidrológica que puede favorecer la concentración de flujo y la erosión localizada. La persistencia de estas condiciones señala una potencial amenaza para la infraestructura vial, requiriendo medidas preventivas.

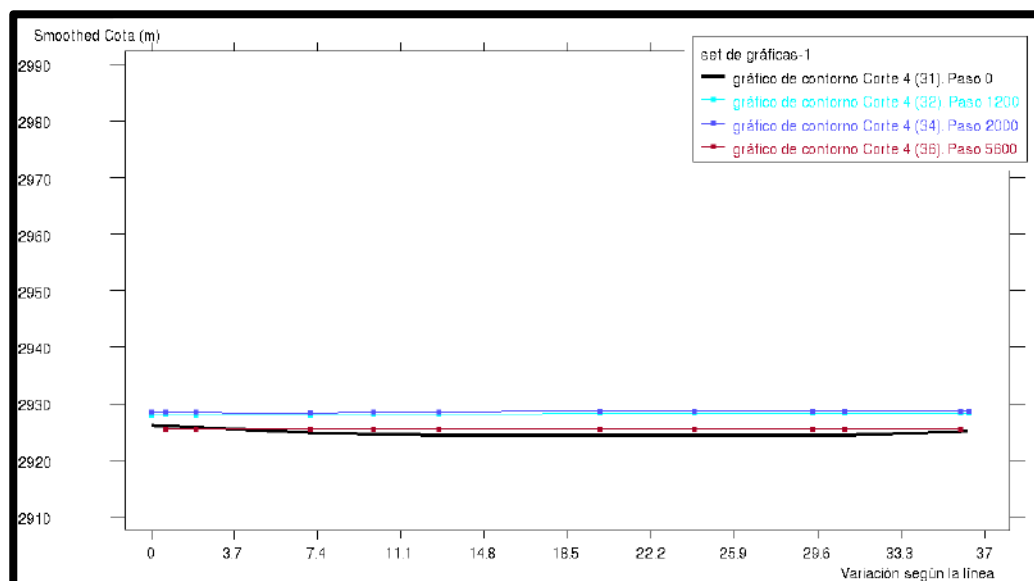
Figura 42 — Perfil hidrodinámico PH-2 en diferentes pasos temporales



NOTA

A pesar de su aparente estabilidad, el perfil del corte 3 presenta fluctuaciones suficientes para indicar estrés hidrológico en la zona. La diferencia entre perfiles base y simulados evidencia que el terreno está bajo condiciones que pueden favorecer el deterioro progresivo y la pérdida de soporte.

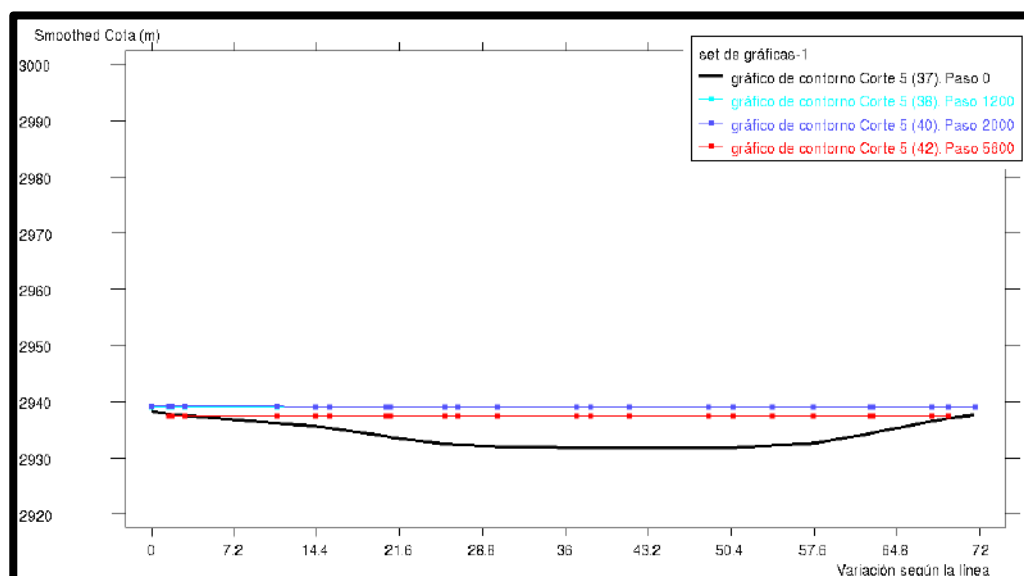
Figura 43 — Perfil hidrodinámico PH-3 en diferentes pasos temporales



NOTA

Aunque el perfil parece estable, las pequeñas variaciones en cotas son indicativas de una sensibilidad elevada a cambios hidrodinámicos. Esta situación puede precipitar procesos erosivos bajo eventos extremos, afectando la integridad de la vía y su entorno.

Figura 44 — Perfil hidrodinámico PH-4 en diferentes pasos temporales

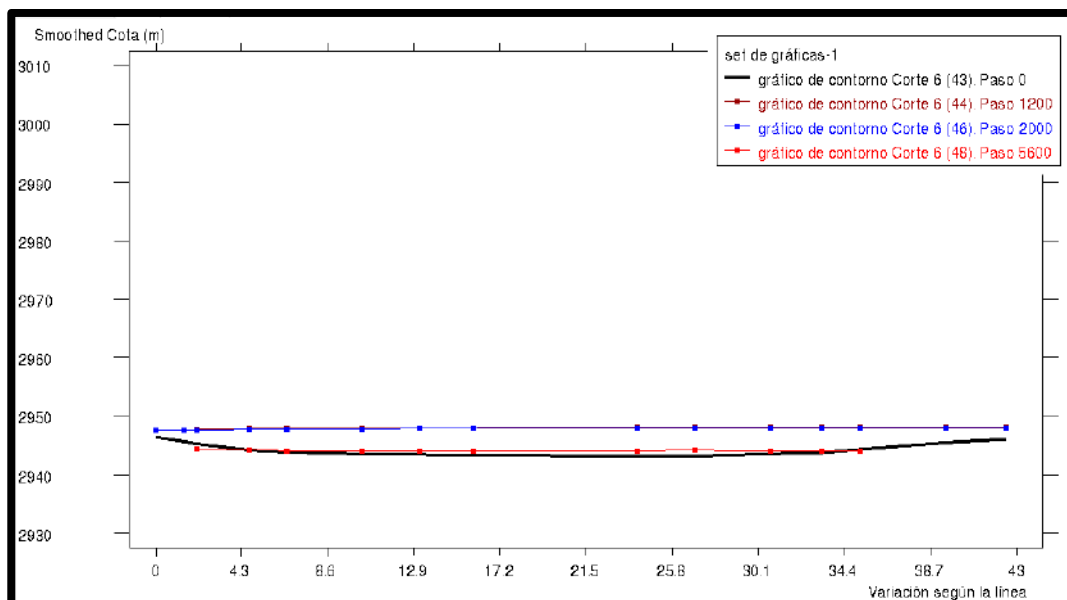


NOTA

El marcado hundimiento en el perfil, sumado a las diferencias entre pasos de simulación, confirma la existencia de un punto crítico de concentración de flujo y

posible socavación. Esta condición representa un riesgo severo para la seguridad y funcionalidad de la infraestructura vial.

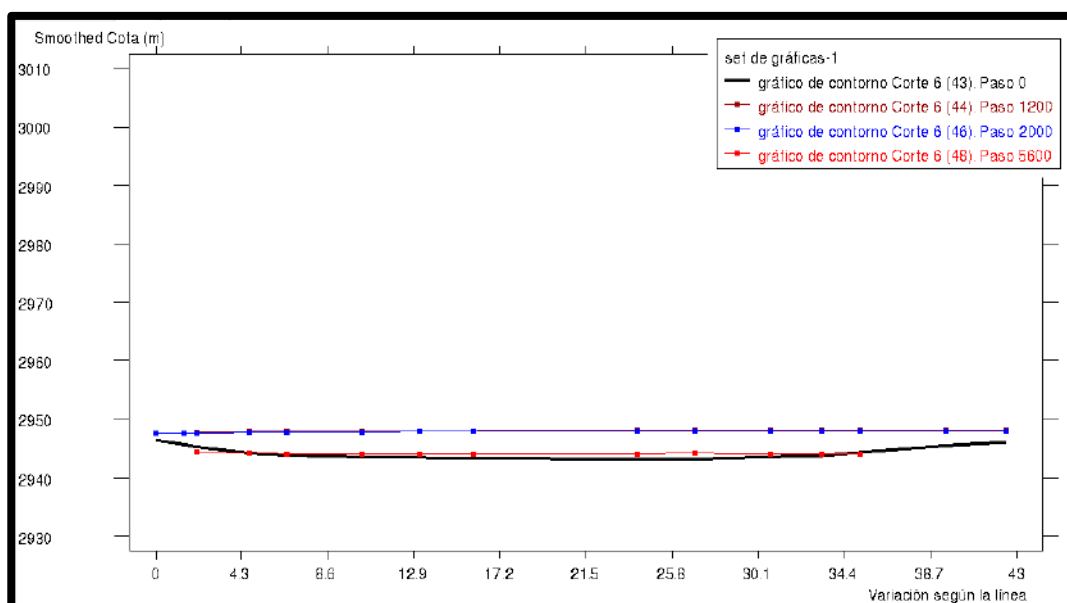
Figura 45 — Perfil hidrodinámico PH-5 en diferentes pasos temporales



NOTA

La depresión sostenida y la variabilidad entre pasos de simulación evidencian una zona con alto riesgo de saturación y erosión. La estabilidad del terreno está comprometida, requiriendo intervención para evitar daños mayores en la vía.

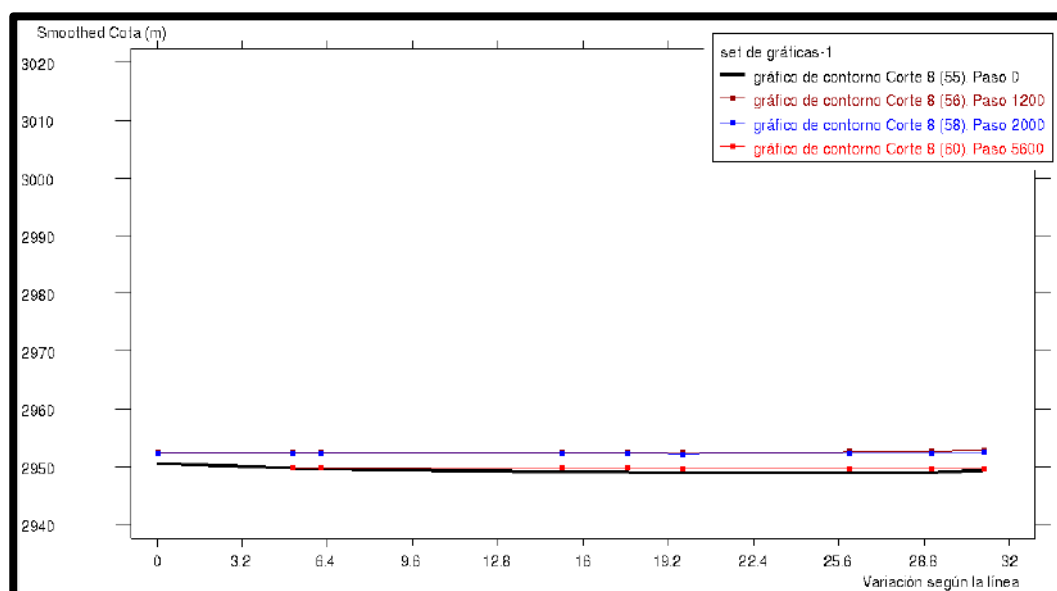
Figura 46 — Perfil hidrodinámico PH-6 en diferentes pasos temporales



NOTA

Aunque el perfil se mantiene relativamente constante, las pequeñas fluctuaciones pueden ser indicativas de un sistema en equilibrio precario, vulnerable a perturbaciones hidrodinámicas que podrían desencadenar daños estructurales inesperados.

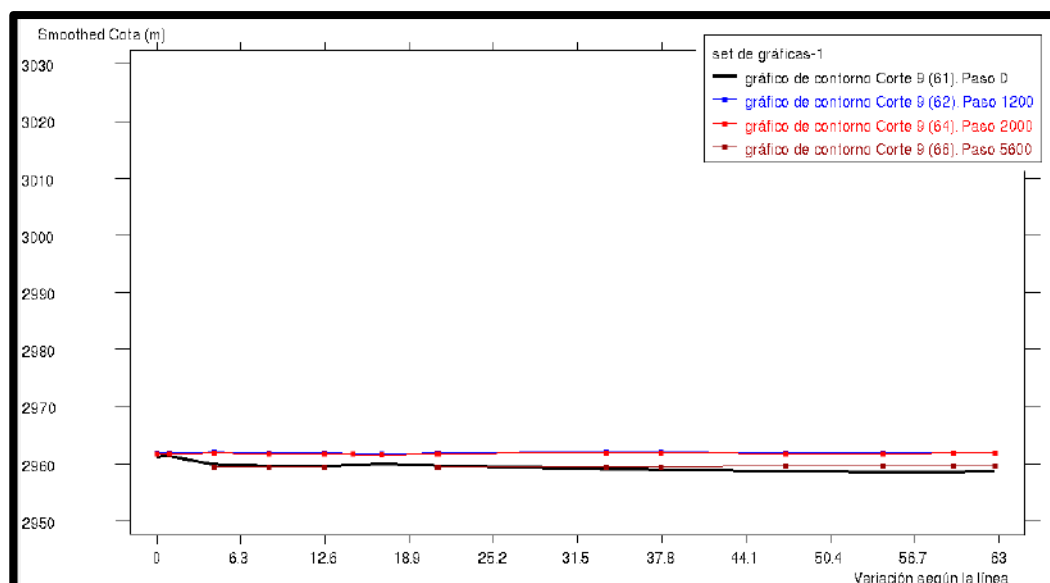
Figura 47 — Perfil hidrodinámico PH-7 en diferentes pasos temporales



NOTA

La homogeneidad en las cotas esconde una sensibilidad elevada ante condiciones hidrológicas extremas, con posibles efectos erosivos no evidentes en etapas tempranas de la simulación, que pueden impactar negativamente la infraestructura vial.

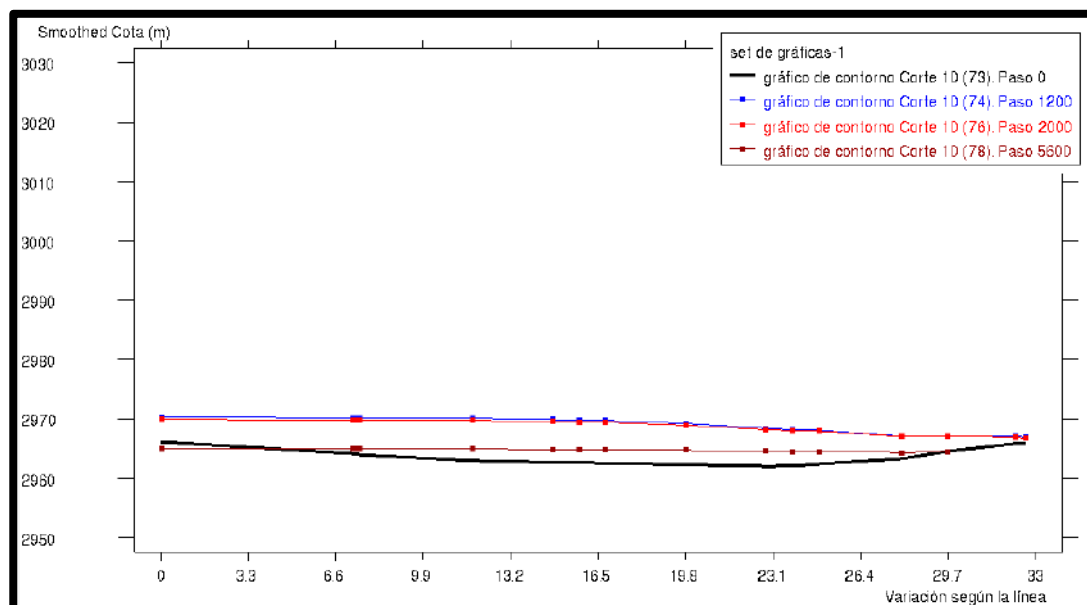
Figura 48 — Perfil hidrodinámico PH-8 en diferentes pasos temporales



NOTA

La depresión ligera y las fluctuaciones marginales entre pasos sugieren un proceso continuo de degradación del terreno, con potencial para afectar la capacidad portante y generar fallas en la estructura vial.

Figura 49 — Perfil hidrodinámico PH-9 en diferentes pasos temporales



NOTA

La depresión central y el aumento de cotas en la simulación revelan áreas con tendencia a la acumulación de agua y posibles procesos de socavación. Estas condiciones configuran un escenario de riesgo elevado para la durabilidad y seguridad vial.

Figura 50 — Perfil hidrodinámico PH-10 en diferentes pasos temporales

Tabla 36 — Perfil hidráulico

GRUPO	Este	Norte	Cota	Profundidad	V_Total	Caudal	Pendiente Hidráulica	Carga Hidráulica
P-01	687734,00	8419554,00	2910,00	2.432	6.012	73.954	0.004656	2911.885225
P-02	688131,00	8419390,00	2912,00	3.9199	5.856	114.772	0.016598	2913.747768
P-03	688475,00	8419146,00	2919,00	3.6094	6.126	110.597	0.013997	2920.914170
P-04	688875,00	8418991.86	2925,00	2.9196	4.973	72.589	0.015829	2926.260255
P-05	689254,00	8418764,00	2932,00	4.1082	3.181	65.348	0.017379	2926.260255
P-06	689695,00	8418632,00	2940,00	8.2234	4.507	185.294	0.004061	2941.035100
P-07	690112,00	8418370,00	2942,00	4.7742	5.764	137.586	0.011291	2943.693210
P-08	690576,00	8418111,00	2948,00	3.4531	6.745	116.455	0.019350	2950.318812
P-09	690975,00	8417872,00	2957,00	2.9302	8.594	125.911	0.011998	2960.764402
P-10	691386,00	8417941,00	2962,00	6.7553	7.428	250.890	0.01086	2964.812160

NOTA

La tabla presenta datos claves del perfil hidráulico en diez puntos del tramo estudiado, incluyendo coordenadas, altitud, profundidad, velocidad total del flujo, caudal, pendiente hidráulica y carga hidráulica.

- **Velocidad total (V_total):** Varía entre 3.181 m/s (P-05) y 8.594 m/s (P-09), indicando que el flujo no es homogéneo y que existen zonas con mayor rapidez del agua, debido a la pendiente y la geometría del cauce.
- **Caudal:** Fluctúa entre aproximadamente 65.3 m³/s (P-05) y 250.9 m³/s (P-10), mostrando que el volumen de agua que pasa por cada sección también varía significativamente, probablemente por cambios en la profundidad y velocidad del río.
- **Pendiente hidráulica** oscila entre 0.004061 (P-06) y 0.019350 (P-08), con una pendiente en P-10 de 0.01086 que indica una inclinación moderada en esa sección del

cauce. Esta pendiente es suficiente para mantener un flujo eficiente sin generar un aumento abrupto en la velocidad que podría causar erosión excesiva.

- **Carga hidráulica:** Va aumentando progresivamente con la altitud y la velocidad, desde aproximadamente 2911.9 m en P-01 hasta 2964.8 m en P-10. Esta magnitud representa la energía total del agua en cada punto, incluyendo energía potencial y cinética.
- **Profundidad:** Oscila entre 2.432 m y 8.223 m, afectando directamente el área transversal y por ende el caudal en cada sección. P-06 tiene la mayor profundidad, lo que contribuye a su alto caudal.

En conjunto, estos datos reflejan un comportamiento hidrodinámico dinámico y heterogéneo en el tramo, con zonas de mayor velocidad y caudal, y pendientes hidráulicas variables que impactan en la distribución de la energía hidráulica. Esta información es vital para identificar áreas críticas que podrían ser más vulnerables a desbordes o erosión, así como para diseñar medidas de protección y optimizar la infraestructura vial en el área.

1.1.1.4 Profundidad del agua

La medición de la profundidad del agua en el área de estudio es un aspecto crucial para entender el comportamiento del río Chalhuanca durante los eventos de desbordes y su impacto en la infraestructura vial en el tramo Km 339+200 al 343+200 de la carretera PE-30A en Chalhuanca, Apurímac. Esta información es esencial para el análisis hidrodinámico, ya que permite conocer cómo varían las profundidades del agua a lo largo del río en distintos escenarios de caudal y lluvia, lo que ayuda a evaluar la vulnerabilidad de la infraestructura ante las crecidas del río.

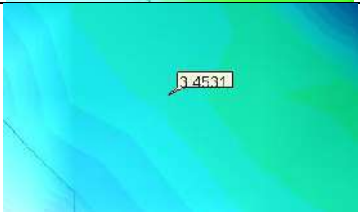
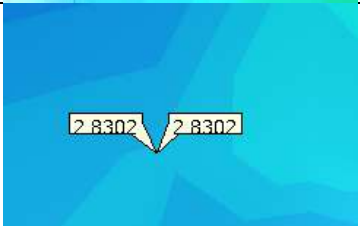
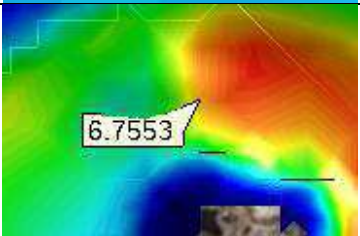
Resultados Esperados: El análisis de la profundidad del agua permitirá modelar los efectos de las crecidas en la infraestructura vial, proporcionando una visión clara de las zonas más vulnerables a la erosión y los desbordes. La información obtenida será fundamental para ajustar los modelos predictivos y proponer soluciones efectivas, como el refuerzo de las estructuras viales o la creación de barreras de contención.

Además, los datos de profundidad del agua servirán como base para recomendar mejoras en los sistemas de drenaje de la carretera y en la planificación de futuras intervenciones en la zona.

La profundidad del río variará dependiendo del caudal del agua. En eventos de crecidas o desbordes, la profundidad aumentará significativamente en ciertas áreas. Es importante describir cómo cambian los niveles de agua según los caudales simulados (bajo, medio, alto).

Tabla 37 — Profundidad del río

GRUPO	ESTE	NORTE	COTA	PROFUNDIDAD	ILUSTRACIÓN
P-01	687734,00	8419554,00	2910,00	2.432	
P-02	688131,00	8419390,00	2912,00	3.9199	
P-03	688475,00	8419146,00	2919,00	3.6094	
P-04	688875,00	8418991.86	2925,00	2.9196	
P-05	689254,00	8418764,00	2932,00	4.1082	
P-06	689695,00	8418632,00	2940,00	8.2234	

P-07	690112,00	8418370,00	2942,00	4.7742	
P-08	690576,00	8418111,00	2948,00	3.4531	
P-09	690975,00	8417872,00	2957,00	2.9302	
P-10	691386,00	8417941,00	2962,00	6.7553	

NOTA:

La **profundidad** varía significativamente entre los puntos, desde 2.432 metros en P-01 hasta 8.223 metros en P-06, lo que refleja una gran heterogeneidad en la topografía de la zona. Este comportamiento indica variaciones en el relieve que pueden influir en el comportamiento del flujo fluvial, especialmente en eventos de crecidas. Las profundidades mayores, como las observadas en puntos como P-06, podrían indicar zonas de mayor acumulación de agua, lo que potencialmente aumenta el riesgo de inundaciones en áreas cercanas a la infraestructura vial. Este tipo de información es crucial para modelar y prever el impacto de las crecidas fluviales en la estabilidad de la infraestructura vial y en la gestión del riesgo de desbordes.

El perfil transversal del río presenta una variabilidad significativa, destacando puntos de mayor profundidad en las curvas del cauce, y áreas de menor profundidad en los tramos rectos. Estas variaciones se ven afectadas también por la naturaleza del lecho fluvial, siendo más profundo en zonas de lecho rocoso y más superficial en zonas arenosas. El impacto de las infraestructuras

viales, como los puentes y caminos, se refleja en la alteración del flujo y la distribución de la profundidad, lo que contribuye a un comportamiento hidráulico distinto en estas áreas.

▪ Pendientes

La clasificación de pendientes es útil para definir la característica del terreno en términos de cómo el agua se desplaza por el área de estudio. Es importante considerar estos rangos de pendiente cuando se modelan los desbordes fluviales y se realiza la evaluación de la infraestructura vial que podría verse afectada por eventos de lluvias intensas.

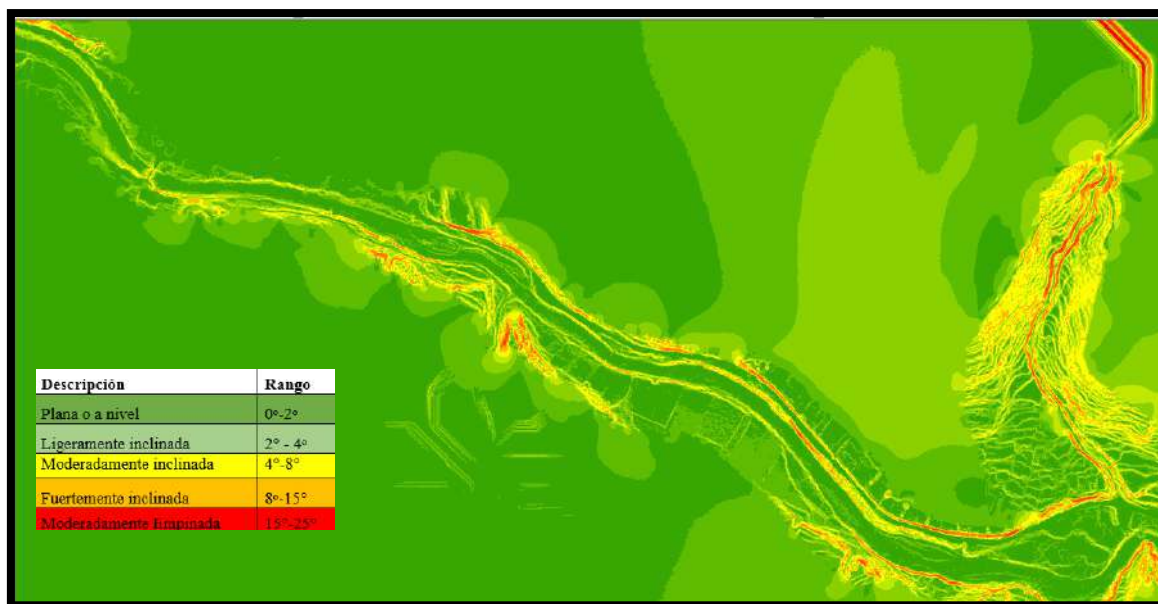
Tabla 38 — Rangos de pendientes

Descripción	Rango
Plana o a nivel	0°-2°
Ligeramente inclinada	2° - 4°
Moderadamente inclinada	4°-8°
Fuertemente inclinada	8°-15°
Moderadamente Empinada	15°-25°
Empinada	25° - 50°
Muy Empinada	50° - 75°
Extremadamente Empinada	>75

Fuente — Reglamento de Clasificación de tierras

NOTA

La tabla muestra la **clasificación de pendientes** del terreno según el **ángulo de inclinación**. Esta clasificación es fundamental para realizar análisis **hidrológicos**, de **infraestructura** y para la **gestión de riesgos** en proyectos de ingeniería y urbanismo. Los rangos de pendiente son usados para determinar las características del terreno y predecir cómo los flujos de agua se desplazan sobre las superficies. Los rangos se dividen en diferentes categorías, desde terrenos planos hasta **pendientes extremadamente empinadas**, lo cual tiene implicaciones para la **viabilidad del proyecto** y la **planificación de medidas preventivas** ante desastres naturales como deslizamientos.



NOTA

La figura muestra el rango de pendientes del área de investigación de Chalhuanca. El mapa utiliza colores para representar diferentes rangos de pendiente en grados, que varían desde terrenos planos hasta pendientes extremadamente empinadas. Estos rangos son importantes para la planificación y diseño de proyectos de infraestructura, así como para evaluar el riesgo de deslizamientos o inundaciones debido a la inclinación del terreno.

Figura 51 — Rangos de pendiente área de investigación – Chalhuanca

1.1.1.5 Velocidad

La **velocidad del flujo** está estrechamente relacionada con el **caudal** del agua y la **geometría** del río. A medida que aumenta el caudal, la velocidad del flujo también aumenta en zonas de menor resistencia (por ejemplo, en tramos rectos del cauce). En cambio, en áreas donde el cauce se estrecha o presenta mayor resistencia debido a la vegetación o las infraestructuras viales, la velocidad tiende a disminuir.

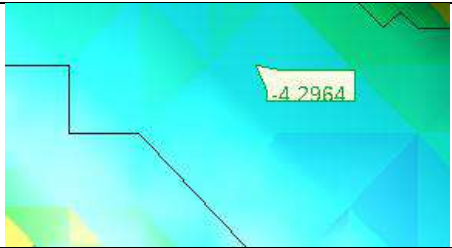
En los eventos de caudal máximo, simulado mediante el modelo IBER, se observa un aumento considerable de la velocidad del flujo, especialmente en áreas críticas del cauce. Estos incrementos pueden generar riesgos para la infraestructura vial adyacente, al provocar erosión en las orillas y al reducir la estabilidad de los materiales del lecho.

Los puentes y caminos en el área afectan la dinámica del flujo, aumentando la velocidad en las zonas estrechadas, lo que podría contribuir a una mayor erosión en

esos puntos. Además, el análisis de la vegetación en las riberas indica que áreas con vegetación densa tienen una velocidad reducida, lo que podría ser beneficioso en términos de control de la erosión.

Tabla 39 — Velocidad

GRUPO	ESTE	NORTE	COTA	Vx	Vy	ILUSTRACIÓN
V - 01	687734,00	8419554,00	2910,00	6.0771	0.2387	
V - 02	688131,00	8419390,00	2912,00	3.9009	4.3674	
V - 03	688475,00	8419146,00	2919,00	5.824	1.9071	
V - 04	688875,00	8418991.86	2925,00	2.3924	4.3592	
V - 05	689254,00	8418764,00	2932,00	3.1572	0.39154	

V - 06	689695,00	8418632,00	2940,00	4.2964	1.36	
V - 07	690112,00	8418370,00	2942,00	5.3597	2.12	
V - 08	690576,00	8418111,00	2948,00	5.9322	3.21	
V - 09	690975,00	8417872,00	2957,00	7.1219	4.81	
V - 10	691386,00	8417941,00	2962,00	6.3764	3.81	

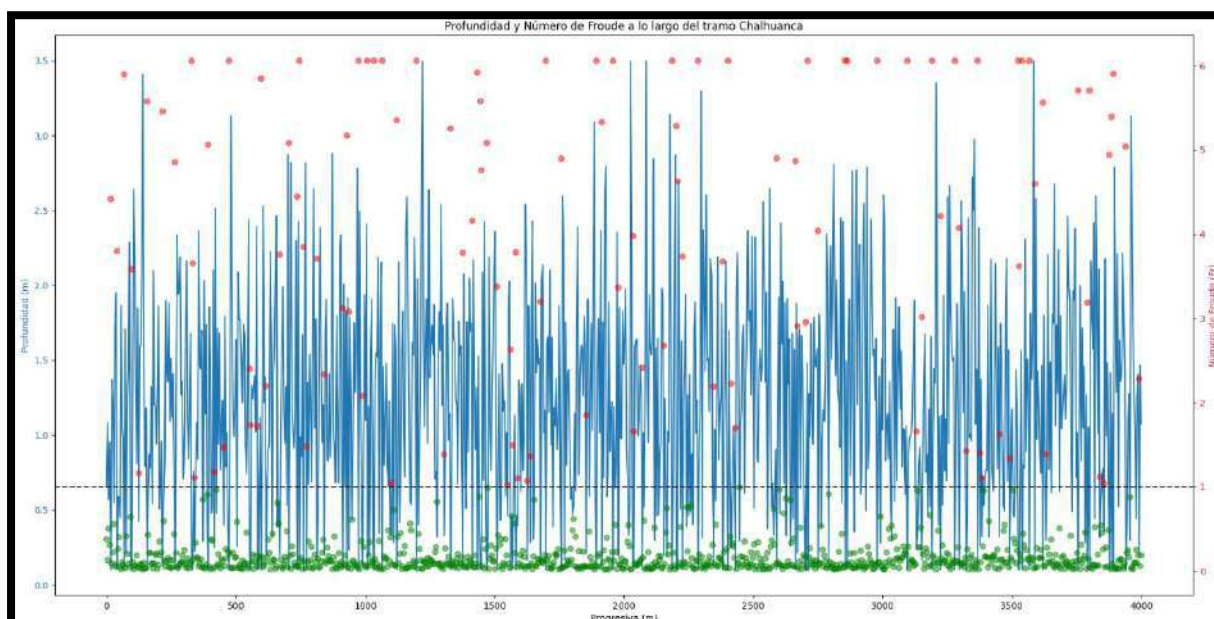
NOTA

Los puntos de medición muestran que la **velocidad del flujo** varía significativamente a lo largo del tramo, con valores más altos en **V-09** (7.1219 m/s en Vx y 4.81 m/s en Vy) y más bajos en **V-04** (2.3924 m/s en Vx y 4.3592 m/s en Vy). Esta variabilidad en las velocidades, tanto en la dirección **Este-Oeste** como en la **Norte-Sur**, sugiere que existen diferencias en las características del cauce y el terreno, como la pendiente, la rugosidad del lecho y el caudal del

agua. Estos datos son cruciales para realizar un análisis hidrodinámico detallado y evaluar el impacto de las velocidades del flujo en la infraestructura vial y la posible inundación del área.

1.1.1.6 Modelos predictivos.

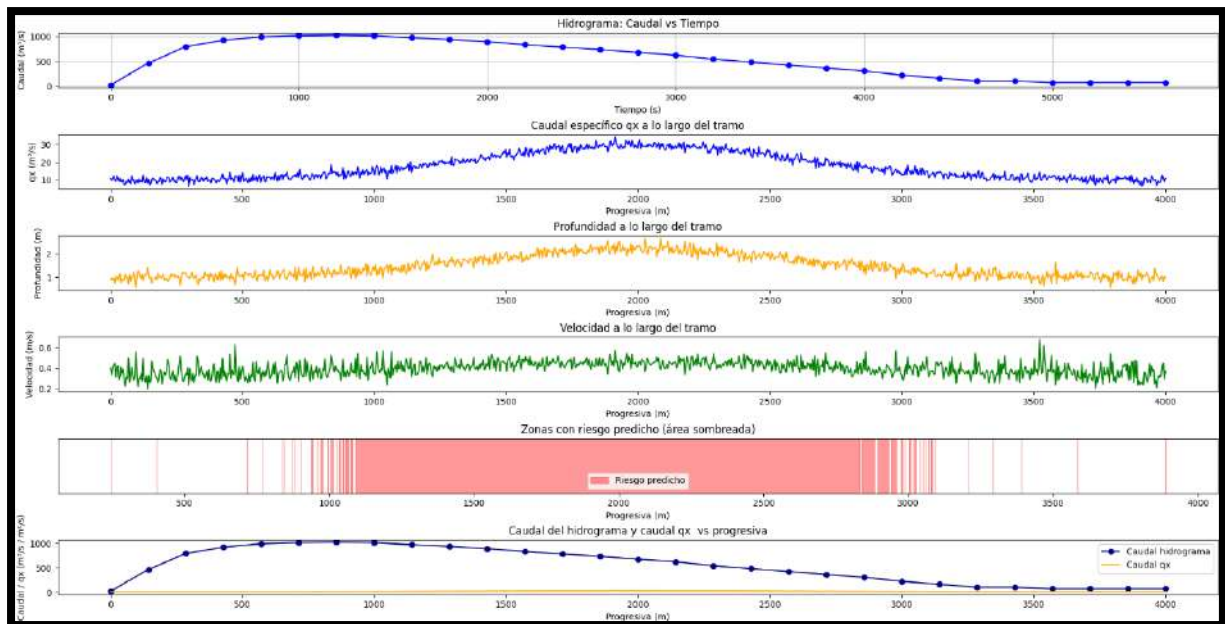
En esta sección se presenta el análisis detallado de los resultados obtenidos mediante los modelos predictivos desarrollados para la variable dependiente: riesgo hidráulico asociado al desborde y afectación de la infraestructura vial en el tramo km 339+200 al 343+200 del río Chalhuanca.



NOTA

Este gráfico muestra la evolución longitudinal de la profundidad hidráulica y el número de Froude (Fr) a lo largo del tramo vial evaluado. La línea discontinua representa el valor crítico $Fr = 1$, indicador de transición entre flujo subcrítico y supercrítico. La superposición de los datos evidencia la presencia recurrente de zonas con Fr cercano o superior a la unidad, asociadas a potenciales condiciones inestables y riesgo hidrodinámico elevado, fundamentales para la identificación de puntos vulnerables en la infraestructura vial.

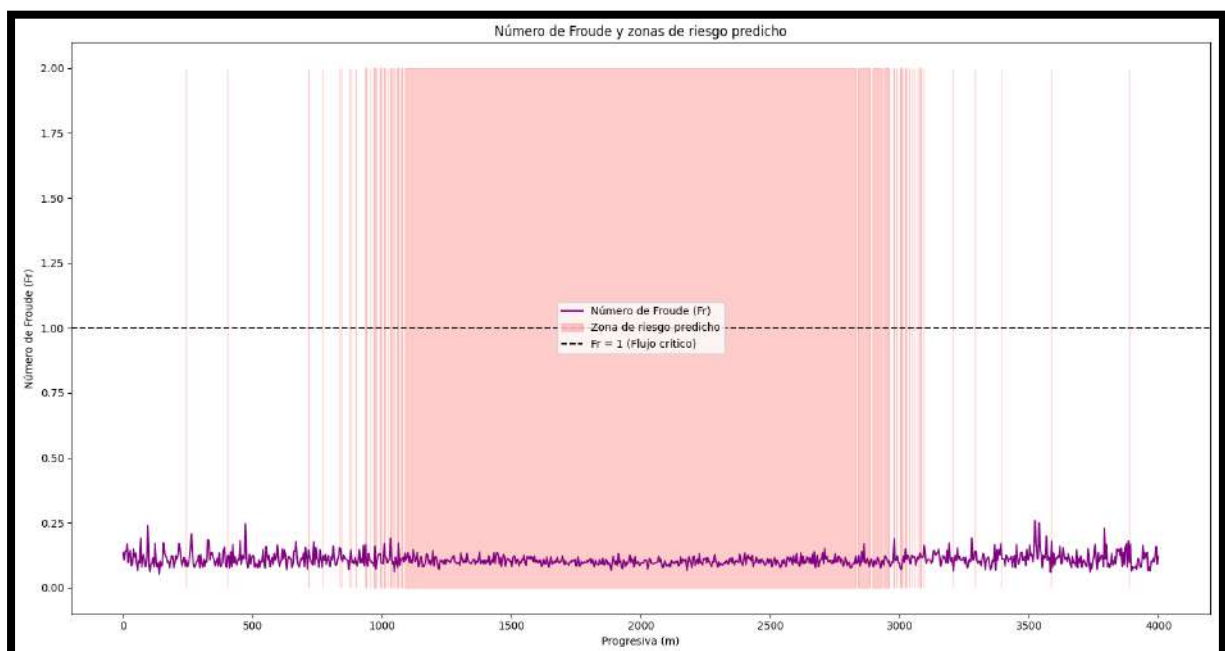
Figura 52 — Matriz de confusión con umbral ajustado / evaluar riesgo de desbordes



NOTA

Este conjunto de gráficos representa el análisis hidrodinámico del tramo en estudio. Se incluye el hidrograma de caudal observado y su comparación con la simulación del caudal específico (qx), profundidades y velocidades a lo largo de la progresiva. La zona sombreada indica las áreas con riesgo predicho de desbordes según el modelo, evidenciando la correlación entre las variables hidráulicas y la susceptibilidad al fallo hidráulico, lo que valida la aplicabilidad del modelo para la gestión del riesgo vial.

Figura 53 — Hidrograma y variables hidráulicas



NOTA

El gráfico presenta el perfil longitudinal del número de Froude en el tramo estudiado, con la demarcación clara de las zonas clasificadas con riesgo hidrodinámico (área sombreada). El umbral crítico $Fr = 1$ se utiliza para identificar flujos críticos, cuya superación está asociada a condiciones de inestabilidad y posibles desbordes. La identificación precisa de estas zonas es esencial para orientar intervenciones en la infraestructura vial y prevenir daños por eventos hidrológicos extremos.

Figura 54 — Número de Froude y zonas de riesgo

1.2 Análisis de los resultados de variable dependiente: Vulnerabilidad de la infraestructura vial

En este apartado se evalúan los resultados obtenidos con respecto al estado y comportamiento de la infraestructura vial ubicada en el tramo km 339+200 al 343+200 del río Chalhuanca, en función del riesgo hidrodinámico predicho mediante el modelo basado en el número de Froude. Los análisis hidrodinámicos realizados revelan zonas críticas donde el flujo alcanza condiciones cercanas o superiores al régimen crítico ($Fr \geq 1$), lo que genera un incremento en la probabilidad de desbordes fluviales que pueden afectar la estabilidad y funcionalidad de la infraestructura vial. Estos eventos hidrológicos extremos pueden desencadenar daños estructurales en elementos tales como la plataforma, drenajes, y obras de protección, comprometiendo la seguridad vial y la continuidad del tránsito.

El modelo predictivo, validado mediante la matriz de confusión, mostró alta precisión en la identificación de dichas zonas vulnerables, lo que permite anticipar posibles escenarios de falla o deterioro. Asimismo, la correlación entre las variables hidráulicas (profundidad, caudal, velocidad) y las áreas de riesgo predicho refuerza la aplicabilidad del enfoque para la gestión y monitoreo de la infraestructura vial. Los resultados sugieren la necesidad de implementar medidas preventivas específicas en los tramos identificados, tales como reforzamiento estructural, mejoras en sistemas de drenaje y planes de mantenimiento periódico, para mitigar el impacto de eventos hidrológicos y prolongar la vida útil de la infraestructura.

En resumen, la variable dependiente "vulnerabilidad de la infraestructura vial" muestra una vulnerabilidad significativa en las zonas con condiciones hidrodinámicas críticas,

validando la importancia del análisis predictivo para la planificación y toma de decisiones en proyectos de gestión de riesgos fluviales.

1.2.1 Registro de los daños estructurales y efectos de los desbordes fluviales.

Tabla 40 —Resumen de daños estructurales y efectos de los desbordes fluviales.

PROGRESIVA		DETALLE		
INICIO	FIN	LONGITUD	ANCHO	TIPO DE DAÑO
339+ 200 km	339+350 km	150 m	4.20 m	Encharcamiento y socavación del margen derecho e izquierdo del río, 200 metro aguas arriba del grifo los cedros.
339+350 km	339+ 450 km	100 m	8.00 m	Socavación del margen derecho del cauce, intersección de río Chalhuanca Unchiña con Chalhuanca.
339+ 450 km	339+ 550 km	100 m	25.00 m	Perdida de plataforma de vía panamericana, margen derecho del cause
339+ 550 km	339+ 650 km	100 m	8–10 m	Socavación, inundación de cause del río margen derecho
339+ 650 km	339+ 750 km	100 m	22.00 m	Perdida de talud inferior del cauce del río margen izquierdo.
339+ 750 km	340+ 050 km	300 m	-	Perdida de 06 unidades de postes de concreto para luz in. 01 und de transformador
340+ 050 km	340+ 150 km	100 m	-	Perdida de 03 viviendas, margen derecho del cauce del río
340+ 150 km	340+ 250 km	100 m	8.00 m	Socavación y colapso de alcantarilla, margen derecho del cauce del río
340+ 250 km	340+ 350 km	100 m	5.00 m	Socavación y colapso de alcantarilla, margen derecho del cauce del río
340+ 350 km	340+ 450 km	100 m	7.00 m	Socavación y colapso de alcantarilla, margen derecho del cauce del río
340+ 450 km	340+ 550 km	100 m	12.00 m	Socavación y colapso de alcantarilla, margen derecho del cauce del río
340+ 550 km	340+ 650 km	100 m	9.00 m	Socavación de alcantarilla, margen derecho del cauce del río
340+ 650 km	340+ 750 km	100 m	4.80 m	Socavación y colapso de defensa de ribereña (muro de contención de concreto), margen derecho del cauce de río
340+ 750 km	340+ 850 km	100 m		Perdida de defensa ribereña de concreto ciclópeo
340+ 850 km	340+ 900 km	50 m		Erosión de estribos de puente
340+ 900 km	341+ 050 km	150 m	4.20 m	Acumulación de lodo, árboles y piedras sobre rasante de vía (h=1.50)
341+ 050 km	341+ 150 km	100 m	4.20 m	Acumulación de lodo, árboles y piedras sobre rasante de vía (h=0.80)

SECTOR CHUQUINGA Y PAIRACA				
341+ 150 km	341+ 170 km	20m	30m	Socavación de predio en el sector Pairaca a la altura de puente que conecta con el centro poblado de Chuquinga, el cual se encuentra con alto riesgo de colapso.
341+ 170 km	341+ 230 km	60m	35m	Socavación de predio afectados en el centro poblado Chuquinga en los cuales se encuentra en estado crítico con riesgo de colapsar.
341+ 230 km	341+ 260 km	30m	30m	Socavación de predio afectados en el centro poblado Chuquinga en el margen izquierdo y en centro poblado Pairaca margen derecho en los cuales se encuentra en estado crítico con riesgo de colapsar.
341+ 290 km	341+ 310 km	30m	30m	Socavación de predio en el margen izquierdo de Chuquinga, se verifico la perdida de bienes
341+ 310 km	341+ 340 km	30m	30m	Socavación de predio en el margen izquierdo de Chuquinga, se constató la perdida de animales, frutales al borde de la orilla.
341+ 340 km	341+ 370 km	30m	30m	Socavación de predio en el margen izquierdo de Chuquinga, se constató la obra de arte de gaviones en estado colapso.
341+ 370 km	341+ 400 km	30m	40m	Socavación de predio en el margen izquierdo de Chuquinga, se constató la obra de arte de gaviones en estado colapso.
341+ 400 km	341+ 430 km	30m	40m	Socavación de predio en el margen izquierdo de Chuquinga, se constató la obra de arte de gaviones en estado colapso.
341+ 430 km	341+470 km	40m	40m	Socavación de predio en el margen izquierdo de Chuquinga, se constató la obra de arte de gaviones en estado colapso.
341+470 km	341+510 km	40m	40m	Socavación de predio en el margen izquierdo de Chuquinga, se constató la obra de arte de gaviones en estado colapso.
341+510 km	341+550 km	40m	30m	Socavación de predio en el margen izquierdo de Chuquinga, se constató la perdida de animales como chanchos ,gallinas.
341+550 km	341+580 km	30m	30m	Socavación de predio en el margen izquierdo de Chuquinga, se constató la perdida de animales como chanchos ,gallinas.

341+580 km	341+620 km	40m	30m	Socavación de predio en el margen izquierdo de Chuquinga, se constató la pérdida de animales como chanchos ,gallinas.
341+620 km	341+650 km	30m	30m	Socavación de predio en el margen izquierdo de Chuquinga, se constató la pérdida de animales como chanchos ,gallinas.
341+650 km	341+680 km	30m	30m	Socavación de predio en el margen izquierdo de Chuquinga y margen derecho de Pairaca se constató la socavación de las viviendas que se encuentran al borde del cauce del rio.
341+680 km	341+710 km	30m	30m	Socavación de predio en el margen izquierdo de Chuquinga y margen derecho de Pairaca se constató la socavación de las viviendas que se encuentran al borde del cauce del rio.
341+710 km	341+740 km	30m	30m	Socavación de predio en el margen izquierdo de Chuquinga y margen derecho de Pairaca se constató la socavación de las viviendas que se encuentran al borde del cauce del rio.
341+740 km	341+770 km	30m	30m	Socavación de predio en el margen izquierdo de Chuquinga y margen derecho de Pairaca se constató la socavación de las viviendas que se encuentran al borde del cauce del rio.
341+770 km	341+810 km	40m	30m	Socavación de predio en el margen izquierdo de Chuquinga y margen derecho de Pairaca se constató la socavación de las viviendas que se encuentran al borde del cauce del rio.
341+810 km	341+870 km	60m	40m	Socavación de predio en el margen izquierdo de Chuquinga, se constató la obra de arte de gaviones en estado colapso.
341+870 km	341+950 km	80m	40m	Socavación de predio en el margen izquierdo de Chuquinga, se constató la obra de arte de gaviones en estado colapso.
341+950 km	341+980 km	30m	40m	Socavación de predio en el margen izquierdo de Chuquinga, se constató la obra de arte de gaviones en estado colapso.
341+980 km	342+050 km	70m	40m	Socavación de predio en el margen izquierdo de Chuquinga, se constató la obra de arte de gaviones en estado colapso.
342+050 km	342+100 km	50m	40m	Socavación de predio en el margen izquierdo de Chuquinga, se constató la obra de arte de gaviones en estado colapso.

342+100 km	342+150 km	50m	40m	Socavación de predio en el margen izquierdo de Chuquinga, se constató la obra de arte de gaviones en estado colapso.
342+150 km	342+230 km	80m	40m	Socavación de predio en el margen izquierdo de Chuquinga, se constató la pérdida de tierras de cultivo, frutas al borde del caudal.
342+230 km	342+280 km	50m	40m	Socavación de predio en el margen izquierdo de Chuquinga, se constató la pérdida de tierras de cultivo, frutas al borde del caudal.
342+280 km	342+350 km	70m	30m	Socavación de predio en el margen izquierdo de Chuquinga, se constató la pérdida de tierras de cultivo, frutas al borde del caudal.
342+350 km	342+430 km	80m	30m	Socavación de predio en el margen izquierdo de Chuquinga, se constató la pérdida de tierras de cultivo, frutas al borde del caudal.
342+430 km	342+490 km	60m	30m	Socavación de predio en el margen izquierdo de Chuquinga y margen derecho d se constató la obra de arte de gaviones en estado critico
342+490 km	342+550 km	60m	30m	Socavación de predio en el margen izquierdo de Chuquinga y margen derecho d se constató la obra de arte de gaviones en estado critico
342+550 km	342+950 km	400	30m	Socavación de predio en el margen izquierdo de Chuquinga y margen derecho d se constató la obra de arte de gaviones en estado critico
342+950 km	343+200 km	250m	30m	Socavación de predio en el margen derecho de Chuquinga, se constató la obra de arte de gaviones en estado critico

FUENTE: ELABORACION PROPIA

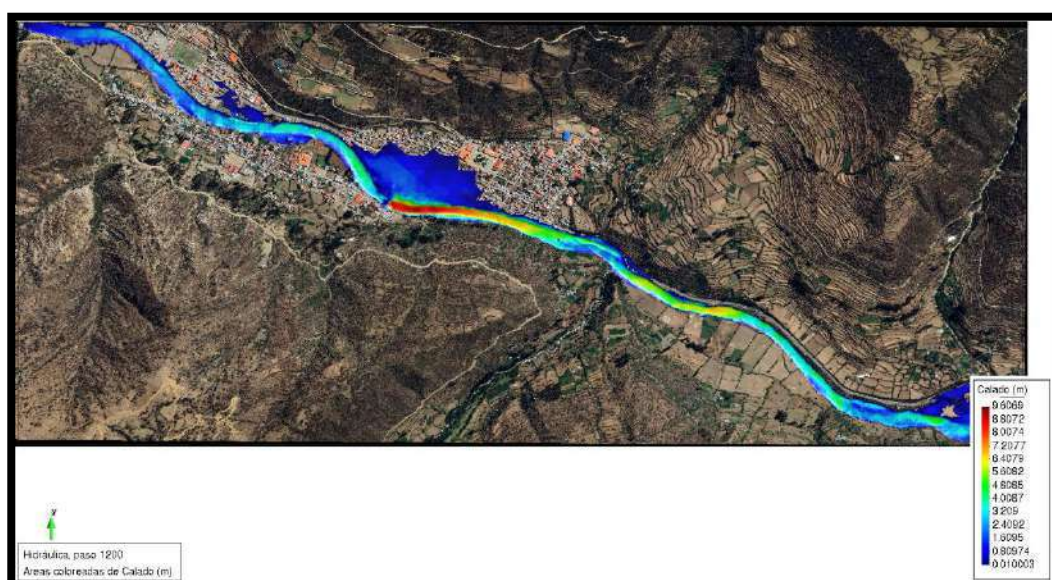
NOTA

La tabla presenta un resumen detallado de los daños causados por desbordamientos fluviales a lo largo del tramo del río Chalhuanca. En ella se describe la longitud y ancho de las áreas afectadas, así como los tipos de daño observados en las diferentes secciones. Los daños incluyen socavación de márgenes, inundación de cauces, colapso de estructuras de gaviones, y la pérdida de bienes como viviendas y animales. Estos eventos de socavación afectan tanto a la infraestructura vial como a la propiedad privada, lo que aumenta el riesgo de colapso de infraestructuras y desastres naturales en la zona. Esta

información es crucial para la gestión de riesgos y la planificación de intervenciones que puedan mitigar el impacto de futuros desbordes y mejorar la seguridad

El modelo predictivo, validado mediante la matriz de confusión, mostró alta precisión en la identificación de dichas zonas vulnerables, lo que permite anticipar posibles escenarios de falla o deterioro. Asimismo, la correlación entre las variables hidráulicas (profundidad, caudal, velocidad) y las áreas de riesgo predicho refuerza la aplicabilidad del enfoque para la gestión y monitoreo de la infraestructura vial.

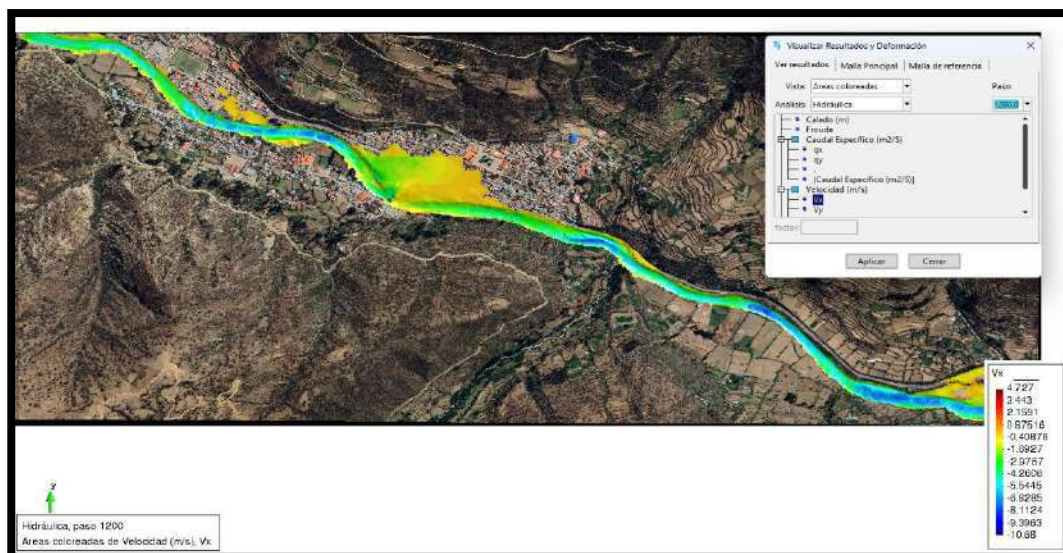
En resumen, la variable dependiente "vulnerabilidad de la infraestructura vial" muestra una vulnerabilidad significativa en las zonas con condiciones hidrodinámicas críticas, validando la importancia del análisis predictivo para la planificación y toma de decisiones en proyectos de gestión de riesgos fluviales. Se realizaron modelados para determinar los daños estructurales, la amenaza fluvial, el índice de vulnerabilidad.



NOTA:

corresponde a un análisis hidrodinámico realizado en el tramo del río Chaluanka entre los km 336+950 y 340+950. El mapa muestra las variaciones de profundidad (calado) del río bajo condiciones de flujo con paso hidráulico 1200, usando una escala de colores que va del azul (poca profundidad) al rojo (mayor profundidad).

Figura 55 — Hidráulica paso 1200 – Calado(profundidad)

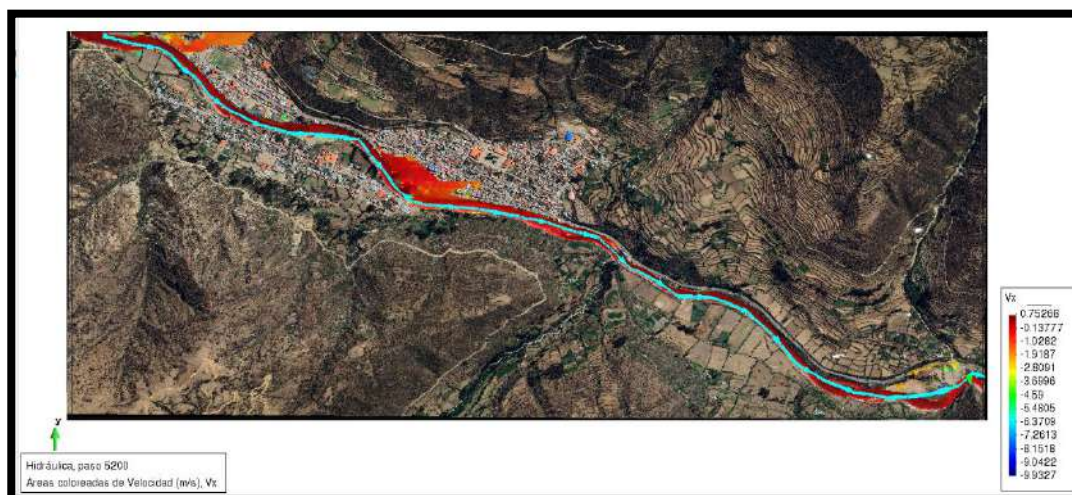


NOTA

Esta gráfica refleja la velocidad del agua en la dirección principal del cauce (x). Identificar zonas de alta velocidad permite prever

posibles puntos de erosión o impacto directo sobre estructuras viales. Los cambios en la velocidad pueden relacionarse con la geomorfología del terreno y la presencia de elementos que alteran el flujo.

Figura 56 — Velocidad del flujo en dirección X (V_x) – paso 1200



NOTA

La imagen muestra el comportamiento de la velocidad del agua en el tramo estudiado del río Chalhuanca. Las áreas en color rojo indican zonas de mayor velocidad, donde el flujo es más rápido, mientras que las zonas en azul muestran velocidades bajas o flujo más lento. Esta distribución es importante para identificar

puntos críticos donde la infraestructura vial podría estar en riesgo por erosión o desbordes fluviales.

Figura 57 — Velocidad del flujo en dirección X (V_x) – paso 5200



NOTA

El mapa representa la velocidad transversal (y) del flujo. Valores positivos y negativos muestran desplazamientos laterales que son clave para analizar la estabilidad de las márgenes y detectar sectores donde el agua pueda generar socavaciones o riesgos para las vías aledañas.

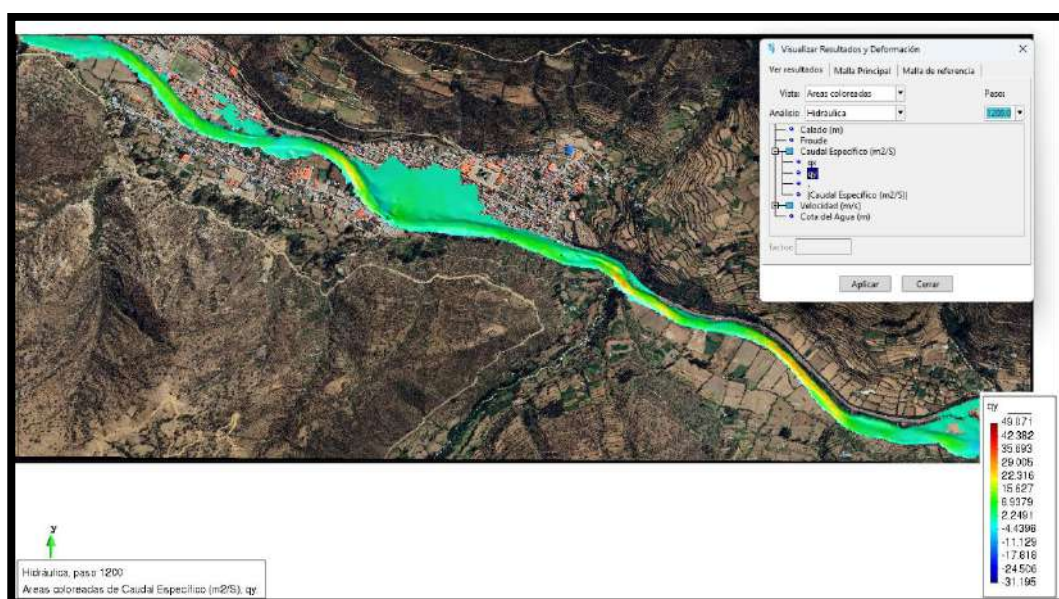
Figura 58 — Velocidad del flujo en dirección Y (V_y)



NOTA

Esta imagen muestra el análisis hidrodinámico del caudal específico en dirección longitudinal (qx) del río Chalhuanca en el tramo estudiado. Los colores indican variaciones del flujo con valores positivos (colores cálidos) y negativos (colores fríos), lo cual permite identificar zonas con mayor concentración de caudal que podrían representar puntos críticos para la infraestructura vial durante un evento de desborde.

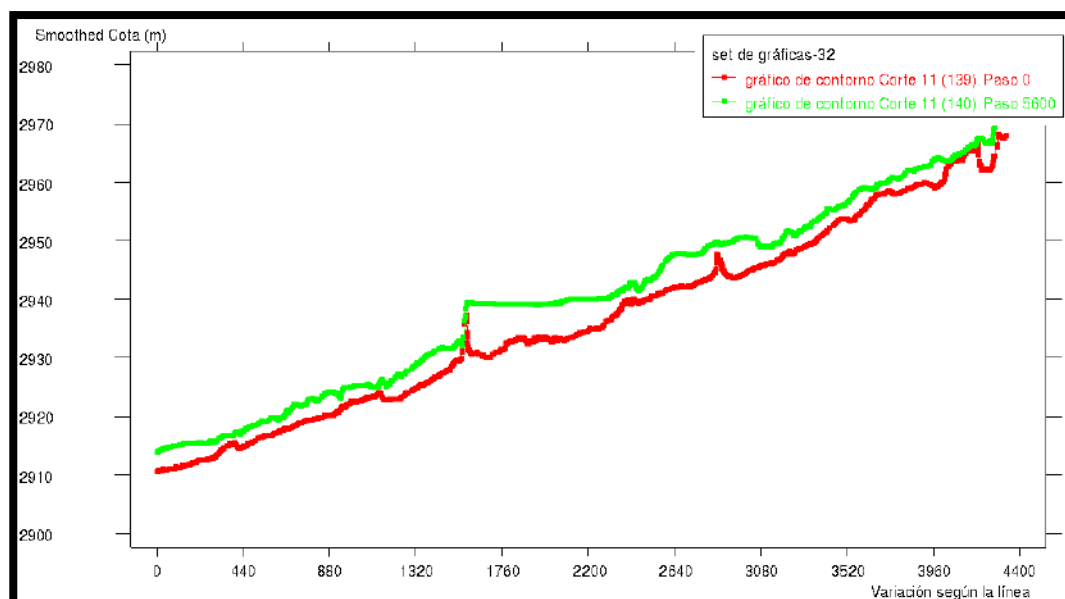
Figura 59 — Distribución del caudal específico en dirección X (qx)



NOTA

La visualización corresponde al caudal específico transversal (qy), que representa los movimientos laterales del flujo en el cauce. La presencia de valores positivos y negativos destaca zonas con desplazamientos laterales del agua que pueden causar erosión en márgenes y afectar la estabilidad de la infraestructura vial cercana al río.

Figura 60 — Distribución del caudal específico en dirección Y (qy)



NOTA

Se presenta la evolución del perfil topográfico a lo largo del corte 11, comparando la cota inicial (paso 0) y la cota tras la simulación (paso 5600). Las diferencias en elevación reflejan procesos de erosión o sedimentación que podrían afectar la estabilidad del suelo y, por ende, la integridad de la infraestructura vial. Este análisis es fundamental para anticipar impactos en la vía y planificar medidas preventivas.

Figura 61 — Perfil antes y después del modelado

Tabla 41 — Nivel de vulnerabilidad

Rango (nivel)	Categoría
0.00 – 0.99	Muy Baja
1.00 – 1.99	Baja
2.00 – 2.99	Media
3.00 – 3.99	Alta
4.00 – 5.00	Muy Alta

NOTA

La tabla presenta una clasificación de los niveles de vulnerabilidad en función del puntaje calculado en una escala de 0 a 5. Esta categorización permite interpretar de manera clara el grado de riesgo o sensibilidad de la infraestructura vial ante

desbordes fluviales. Los rangos asignados facilitan la identificación rápida de zonas con vulnerabilidad crítica (“Muy Alta”) y aquellas con bajo riesgo (“Muy Baja”), lo que es fundamental para priorizar acciones de mitigación, mantenimiento y monitoreo en la gestión del recurso hídrico y la infraestructura.

Tabla 42 — Nivel de vulnerabilidad por puntos de exploración

GRUPO	Este	Norte	Cota	Profundidad	V_Total	Número de froude, (Daños estructurales)	Zona Crítica (Factor de amenaza)	Nivel o índice de vulnerabilidad	Descripción de vulnerabilidad
P-01	687734	8419554,00	2910	2,4320	6,012	0,900	False	2,070	Media
P-02	688131	8419390,00	2912	3,9199	5,856	1,100	True	3,160	Alta
P-03	688475	8419146,00	2919	3,6094	6,126	1,050	True	3,060	Alta
P-04	688875	8418991,86	2925	2,9196	4,973	0,950	False	2,000	Media
P-05	689254	8418764,00	2932	4,1080	3,181	0,850	False	0,000	Muy baja
P-06	689695	8418632,00	2940	8,2234	4,507	1,200	True	3,490	Alta
P-07	690112	8418370,00	2942	4,7742	5,764	1,150	True	3,420	Alta
P-08	690576	8418111,00	2948	3,4351	6,745	1,300	True	3,730	Alta
P-09	690975	8417872,00	2957	2,9302	8,594	1,400	True	4,290	Muy alta
P-10	691386	8417941,00	2962	6,9553	7,428	1,250	True	5,560	Muy alta

$$\text{Nivel de vulnerabilidad} = \frac{\text{Froude escalado} + \text{Velocidad escalada} + \text{Caudal escalado}}{3}$$

$$\text{Escala normalizada} = \left(\frac{\text{valor} - \text{min}}{\text{max} - \text{min}} \right)^{0.5} \times 5$$

NOTA

La tabla muestra el nivel de vulnerabilidad calculado para cada punto de monitoreo en función de tres parámetros hidrodinámicos críticos: el número de Froude, la velocidad total del agua y el caudal. Cada uno de estos parámetros se normaliza mediante una transformación que considera su rango mínimo y máximo, seguida de una raíz cuadrada (exponente 0.5) para dar mayor énfasis a los valores medios y altos, y finalmente se escala a una escala de 0 a 5. El nivel de vulnerabilidad final es el promedio aritmético de estos tres valores normalizados.

Esta metodología permite identificar y clasificar con mayor precisión las zonas críticas, considerando que una mayor vulnerabilidad se asocia con valores elevados en los parámetros hidrodinámicos, reflejando un mayor riesgo de daño o afectación a la infraestructura vial debido a desbordes fluviales. La clasificación se complementa con una descripción cualitativa que facilita la interpretación y la priorización de intervenciones.

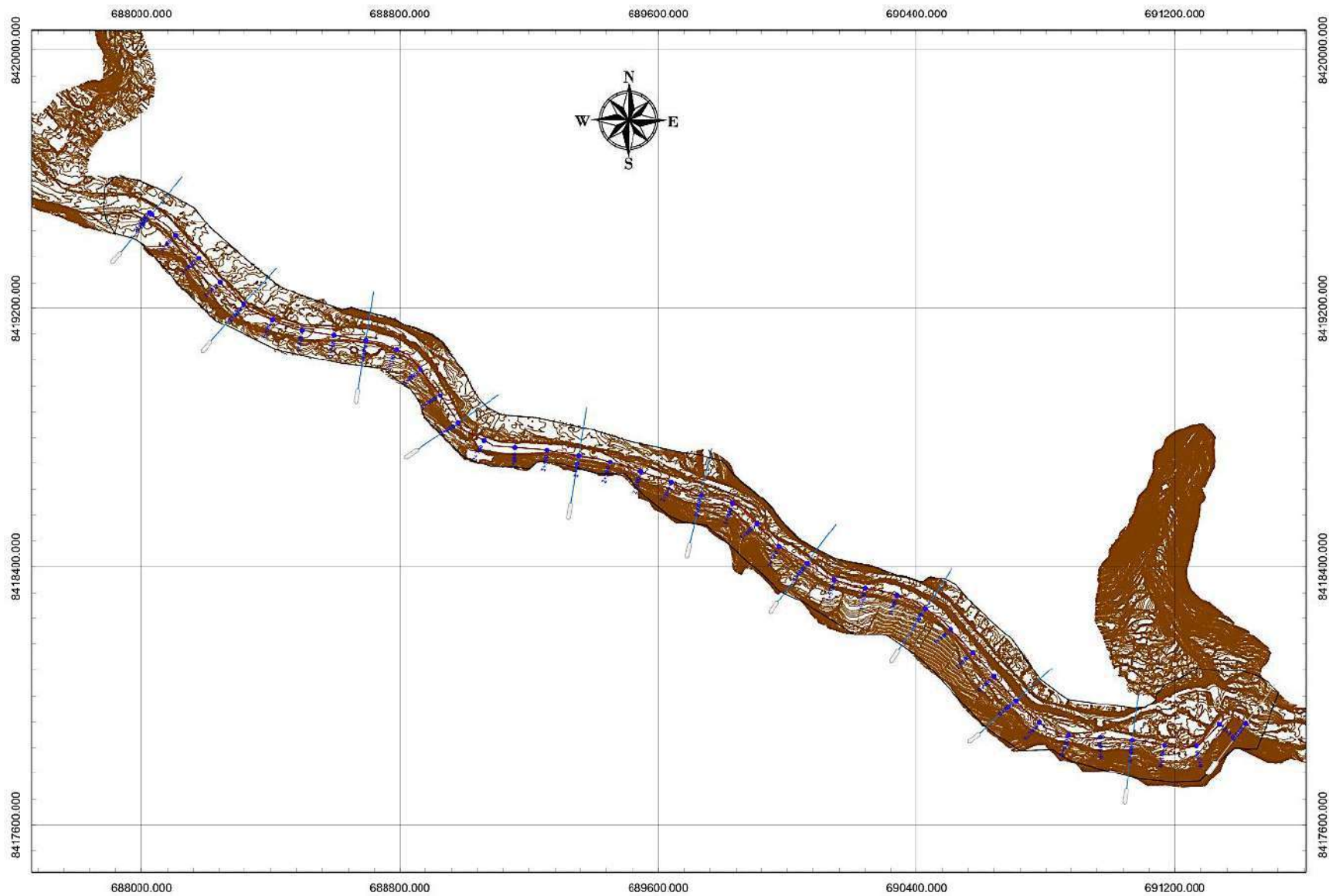


Figura 62 — Ficha de levantamiento topográfico con DRONE.



CUESTIONARIO EN ESCALA LIKERT DE CINCO PUNTOS

Nr.:

1. DATOS GENERALES

Título de Investigación:	Análisis hidrodinámico para determinar la vulnerabilidad de la infraestructura vial ante desbordes fluviales en el tramo km 339+200 al 343+200 del río Chalhuanca, Apurímac, 2025.
Investigador:	Bach. José Armando Condori Arone.
Nombre del instrumento:	Validación de Observación Hidrodinámica y Evaluación de Vulnerabilidad Vial

2. ASPECTOS DE VALIDACION:

Marque con una (X) dentro del cuadro de valoración, solo una vez por cada criterio, el que usted considere sobre el cuestionario.

1	2	3	4	5
Nunca	Casi nunca	A veces	Casi siempre	Siempre

Nº	INDICADORES	VALORACION				
		1	2	3	4	5
Instrumento X – Análisis Hidrodinámico						
1	El agua del río aumenta bastante cuando llueve fuerte.					
2	El agua se sale del río y llega cerca de la carretera.					
3	Se junta agua en partes cercanas a la vía.					
4	El río trae tierra y piedras que llegan hasta la zona de la carretera.					
5	El agua corre más rápido en los puntos peligrosos.					
6	Se ven remolinos o movimientos fuertes del agua cerca de la carretera.					
7	La corriente empuja tierra, ramas o piedras hacia el borde de la vía.					
8	Hay partes del río que se desbordan varias veces al año.					
9	El suelo al costado del río está muy mojado y puede afectar la vía.					
10	El río se mueve hacia los lados y se acerca a la carretera.					
11	El agua trae piedras grandes cuando la lluvia es fuerte.					
12	El nivel del río sube mucho y llega cerca del talud de la carretera.					
13	Se ven marcas que muestran que el agua subió hace poco.					
14	Se forman pozas o aguas quietas que cambian la fuerza del río.					
15	El cauce del río está desgastado y eso puede afectar la protección de la carretera.					
Instrumento Y – Vulnerabilidad de la Infraestructura Vial						
1	Hay desgaste o erosión en los taludes cerca de la vía.					
2	Se caen piedras o tierra por culpa del agua.					
3	El pavimento está hundido o deformado por el agua.					
4	Las cunetas o alcantarillas están dañadas.					
5	Falta tierra en las bermas por acción del agua.					
6	Se ven daños en la plataforma de la carretera.					
7	El tránsito se complica porque hay agua acumulada.					
8	La base de la vía está siendo socavada por el agua.					
9	Las obras de protección (muros, gaviones, mallas) están dañadas.					
10	El agua del río amenaza directamente la carretera.					
11	El talud está inestable por demasiada humedad.					
12	Hay hundimientos o grietas en la calzada por humedad.					
13	Hay pequeños deslizamientos cerca de la carretera.					
14	Después de lluvias fuertes, se ven daños claros en la vía.					
15	El tramo muestra señales de que una parte podría colapsar.					

Sexo: Varón () Mujer ()

Edad:

Cargo o categoría:

Abancay, de Del 2025.

Firma

Figura 63 — Ficha cuestionario en escala likert de cinco puntos.

ANEXO C: CERTIFICADO DE VALIDACION DE INSTRUMENTOS



FICHA DE VALIDACION DE INSTRUMENTO

1. DATOS GENERALES

Título de Investigación:	Análisis hidrodinámico para determinar la vulnerabilidad de la infraestructura vial ante desbordes fluviales en el tramo km 339+200 al 343+200 del río Chalhuanca, Apurímac, 2025.
Investigador:	Bach. Jose Armando Condoni Arone.
Nombre del instrumento:	Validación de Observación Hidrodinámica y Evaluación de Vulnerabilidad Vial

2. DATOS

Nombres y apellidos:	Danny Daniel Saavedra Ore	N° DNI:	72846831
Cargo:	Especialista en Hidrología - SENAMHI		

3. ASPECTOS DE VALIDACION:

Marque con una (X) dentro del cuadro de valoración, solo una vez por cada criterio, el que usted considere sobre el cuestionario.

1	2	3	4	5
Muy bajo	Bajo	Regular	Alto	Muy alto

N°	CRITERIO	INDICADOR	1	2	3	4	5
1	Claridad	Los ítems se comprenden sin dificultad.				X	
2	Pertinencia	Los ítems corresponden al objetivo del instrumento.					X
3	Relevancia	Los ítems son importantes para medir la variable.					X
4	Coherencia	La redacción es consistente con el constructo.				X	
5	Suficiencia	Los ítems cubren adecuadamente la variable.				X	
6	Objetividad	Los ítems no inducen respuestas.					X
7	Precisión	Los ítems son específicos y no ambiguos.				X	
8	Unidimensionalidad	Cada ítem evalúa un solo concepto.				X	
9	Consistencia	Los ítems mantienen lógica y estructura.					X
10	Adecuación	El contenido es apropiado para la población.				X	
11	Relevancia técnica	Los ítems responden a criterios técnicos.					X
12	Pertinencia contextual	Los ítems se ajustan al entorno de estudio.					X
13	Interpretabilidad	Los ítems permiten una interpretación clara.					X
14	Aplicabilidad	Los ítems pueden aplicarse en campo.					X
15	Complejidad	El instrumento cubre todos los aspectos necesarios.				X	

4. ASPECTOS DE VALIDACION:

Se valida (X). No se valida ()

Abancay, 02 de diciembre Del 2025.



Figura 64 — Valoración de instrumento experto N° 01.



FICHA DE VALIDACION DE INSTRUMENTO

1. DATOS GENERALES

Título de Investigación:	Análisis hidrodinámico para determinar la vulnerabilidad de la infraestructura vial ante desbordamientos fluviales en el tramo km 339+200 al 343+200 del río Chalhuanca, Apurímac, 2025.
Investigador:	Bach. Jose Armando Condori Arone.
Nombre del instrumento:	Validación de Observación Hidrodinámica y Evaluación de Vulnerabilidad Vial

2. DATOS

Nombres y apellidos:	Michel Palma Vargas	N° DNI:	42347864
Cargo:	Mg Ingeniería Civil Mención Recursos Hídricos y HA.		

3. ASPECTOS DE VALIDACION:

Marque con una (X) dentro del cuadro de valoración, solo una vez por cada criterio, el que usted considere sobre el cuestionario.

1	2	3	4	5
Muy bajo	Bajo	Regular	Alto	Muy alto

N°	CRITERIO	INDICADOR	1	2	3	4	5
1	Claridad	Los ítems se comprenden sin dificultad.					X
2	Pertinencia	Los ítems corresponden al objetivo del instrumento.				X	
3	Relevancia	Los ítems son importantes para medir la variable.					X
4	Coherencia	La redacción es consistente con el constructo.					X
5	Suficiencia	Los ítems cubren adecuadamente la variable.			X		
6	Objetividad	Los ítems no inducen respuestas.				X	
7	Precisión	Los ítems son específicos y no ambiguos.					X
8	Unidimensionalidad	Cada ítem evalúa un solo concepto.					X
9	Consistencia	Los ítems mantienen lógica y estructura.				X	
10	Adecuación	El contenido es apropiado para la población.				X	
11	Relevancia técnica	Los ítems responden a criterios técnicos.					X
12	Pertinencia contextual	Los ítems se ajustan al entorno de estudio.				X	
13	Interpretabilidad	Los ítems permiten una interpretación clara.				X	
14	Aplicabilidad	Los ítems pueden aplicarse en campo.					X
15	Compleitud	El instrumento cubre todos los aspectos necesarios.					X

4. ASPECTOS DE VALIDACION:

Se valida (X), No se valida ()

Abancay, 02 de Diciembre Del 2025.

Michel Palma Vargas
Ingeniero Civil
C.I.P. 107700

Figura 65 — Valoración de instrumento experto N° 02.



FICHA DE VALIDACION DE INSTRUMENTO

1. DATOS GENERALES

Título de Investigación:	Análisis hidrodinámico para determinar la vulnerabilidad de la infraestructura vial ante desbordamientos fluviales en el tramo km 339+200 al 343+200 del río Chalhuanca, Apurímac, 2025.
Investigador:	Bach. Jose Armando Condori Arons.
Nombre del instrumento:	Validación de Observación Hidrodinámica y Evaluación de Vulnerabilidad Vial

2. DATOS

Nombres y apellidos:	Daniilo Saavedra Ore	N° DNI:	72846839
Cargo:	Docente - Especialista en Estructuras.		

3. ASPECTOS DE VALIDACION:

Marque con una (X) dentro del cuadro de valoración, solo una vez por cada criterio, el que usted considere sobre el cuestionario.

1	2	3	4	5
Muy bajo	Bajo	Regular	Alto	Muy alto

N°	CRITERIO	INDICADOR	1	2	3	4	5
1	Claridad	Los ítems se comprenden sin dificultad.				X	
2	Pertinencia	Los ítems corresponden al objetivo del instrumento.				X	
3	Relevancia	Los ítems son importantes para medir la variable.				X	
4	Coherencia	La redacción es consistente con el constructo.				X	
5	Suficiencia	Los ítems cubren adecuadamente la variable.				X	
6	Objetividad	Los ítems no inducen respuestas.				X	
7	Precisión	Los ítems son específicos y no ambiguos.				X	
8	Unidimensionalidad	Cada ítem evalúa un solo concepto.				X	
9	Consistencia	Los ítems mantienen lógica y estructura.				X	
10	Adecuación	El contenido es apropiado para la población.				X	
11	Relevancia técnica	Los ítems responden a criterios técnicos.				X	
12	Pertinencia contextual	Los ítems se ajustan al entorno de estudio.				X	
13	Interpretabilidad	Los ítems permiten una interpretación clara.				X	
14	Aplicabilidad	Los ítems pueden aplicarse en campo.				X	
15	Compleitud	El instrumento cubre todos los aspectos necesarios.				X	

4. ASPECTOS DE VALIDACION:

Se valida ☒ No se valida ()

Abancay, 02 de Diciembre Del 2025.


 Daniilo Saavedra Ore
 ING. CIVIL
 FIP 208622
 Firma

Figura 66 — Valoración de instrumento experto N° 03.

Validación de instrumento (Alfa de Cronbach)

Tabla 43 — Análisis de validación de instrumento.

Preguntas	Item1	Item2	Item3	Item4	Item5	Item6	Item7	Item8	Item9	Item10	Item11	Item12	Item13	Item14	Item15	Item16	Item17	Item18	Item19	Item20	Item21	Item22	Item23	Item24	Item25	Item26	Item27	Item28	Item29	Item30	SUMA
Encuestados																															
R1	4	3	3	4	5	4	4	3	3	5	4	4	4	3	4	5	4	3	3	4	3	3	3	4	5	4	4	3	4	5	114
R2	5	4	3	3	4	3	3	4	3	3	4	4	4	3	3	3	4	3	2	3	3	4	4	3	3	4	3	4	5	5	106
R3	4	4	3	4	3	4	4	3	4	3	5	4	3	3	4	5	4	4	3	3	3	3	4	3	4	3	4	3	4	5	110
R4	4	3	3	3	4	5	4	4	4	4	3	4	5	4	5	3	3	3	4	4	4	4	3	4	4	3	4	4	4	4	114
R5	4	4	3	4	5	4	3	4	4	5	5	4	5	4	5	4	4	4	4	5	4	4	3	4	4	4	3	5	5	4	124
R6	5	4	3	4	4	4	4	5	4	4	4	4	4	4	5	4	4	3	4	4	4	4	4	3	4	4	4	3	4	4	119
R7	5	4	4	4	4	3	4	3	3	4	4	4	4	4	5	5	5	4	4	4	4	3	4	4	4	3	4	3	4	5	119
R8	5	4	4	3	4	3	4	3	4	4	4	3	3	4	5	5	5	3	4	3	4	4	3	4	3	3	4	5	5	5	117
R9	5	4	3	4	4	4	4	3	4	4	5	5	3	4	5	5	4	3	4	4	3	4	3	4	5	4	3	4	5	5	121
R10	5	4	4	3	4	4	5	4	4	3	4	4	3	4	5	4	4	3	4	4	4	3	3	3	4	4	4	4	5	5	118
R11	4	3	4	4	5	4	4	3	3	5	4	4	4	3	4	5	4	3	3	4	3	3	3	4	5	4	4	3	4	5	115
R12	5	4	5	5	4	3	5	4	3	4	4	4	4	5	5	5	4	3	2	3	3	4	4	3	3	4	3	4	5	5	119
R13	4	4	5	5	3	4	5	3	4	4	5	4	3	3	4	5	4	4	3	3	3	5	5	3	4	4	4	3	4	5	119
R14	4	3	5	5	4	5	5	4	4	4	4	4	5	4	5	3	3	3	4	4	4	5	5	4	4	4	4	4	4	4	124
R15	4	4	5	5	5	4	5	4	4	5	5	4	5	4	5	4	4	4	4	5	4	5	5	4	4	4	3	5	5	4	132
R16	5	4	5	5	4	4	5	5	4	4	4	4	4	4	5	4	4	3	4	4	4	4	5	3	4	4	4	5	4	4	126
R17	5	4	4	5	4	3	5	5	3	4	4	4	4	4	5	5	5	4	4	4	4	4	5	4	4	5	4	5	4	5	129
R18	5	4	4	5	4	3	5	5	4	4	4	5	4	4	5	5	5	5	4	3	4	4	5	4	3	5	4	5	5	5	131
R19	5	4	3	5	4	4	5	5	4	4	5	5	4	4	5	5	4	5	4	4	3	4	5	4	5	4	3	4	5	5	130
R20	5	4	4	5	4	4	5	4	4	3	4	4	4	4	5	4	4	5	4	4	4	5	3	3	4	4	4	4	5	5	125
R21	4	3	4	4	5	4	4	3	3	5	4	4	4	3	4	5	4	3	3	4	3	3	3	4	5	4	4	3	4	5	115
R22	5	4	5	5	4	5	5	5	5	4	4	4	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	144
R23	4	4	5	5	3	4	5	5	4	4	5	4	3	3	4	5	4	4	5	5	5	5	5	3	4	4	4	3	4	5	127
R24	4	5	5	5	4	5	5	5	5	5	5	5	5	4	5	5	5	5	4	5	4	5	5	4	4	4	4	4	4	4	138
R25	4	4	5	5	5	4	5	4	4	5	5	4	5	4	5	5	5	5	4	5	4	5	5	4	4	4	5	5	5	4	137
R26	5	4	5	5	4	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4	4	5	5	5	5	5	5	5	4	4	4	5	4	4	140
R27	5	4	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4	5	5	5	5	5	5	5	4	5	4	4	5	4	5	4	5	142
R28	5	4	3	3	4	3	3	4	3	3	4	4	4	3	3	3	4	3	2	3	3	4	4	3	3	4	3	4	5	5	106
R29	5	5	5	5	4	4	5	5	4	4	5	5	4	4	5	5	4	5	5	5	5	4	5	4	5	5	5	5	5	5	141
R30	5	5	4	5	5	4	5	5	5	5	4	4	4	4	5	4	4	5	4	4	4	5	5	5	4	4	4	4	5	5	135
VARIANZA	0.2	0.3	0.7	0.6	0.3	0.4	0.5	0.6	0.4	0.5	0.3	0.2	0.5	0.3	0.4	0.5	0.3	0.8	0.7	0.5	0.5	0.5	0.8	0.4	0.4	0.3	0.3	0.6	0.3	0.2	

SUM_VAR_ITEMS 13.1567

VAR_TOTAL 111.1122

K 30

Fuente: Elaboración propia.

$$\alpha = \frac{K}{K-1} \left[1 - \frac{\sum S_i^2}{s_T^2} \right]$$

α : Coeficiente de alfa de Cronbach.

K: Numero de ITEMS del instrumento.

$\sum S_i^2$: Sumatoria de varianza de los ITEMS

s_T^2 : Varianza total del instrumento

Donde:

K: = 30

$\sum S_i^2 = 13.1567$

$s_T^2 = 111.1122$

Reemplazando datos se tiene lo siguiente:

$$\alpha = \left(\frac{30}{30-1} \right) \left[1 - \frac{13.1567}{111.1122} \right]$$

$$\alpha = 0.9199$$

Confiabilidad:

Por lo tanto, el alfa de Cronbach se encuentra 0.70 a 0.95 en el rango de confiabilidad

“bueno”

”

ANEXO D: EVIDENCIAS FOTOGRAFICAS, CERTIFICADOS DE EQUIPOS

(Panel fotográfico)



NOTA: En la imagen se puede apreciar la medición del ancho del río; se verifica las condiciones en las que se encuentra el estribo del puente Chalhuanca.

Figura 67 — Medición de ancho del río Chalhuanca.



NOTA: En la imagen se puede apreciar las medidas de protección del colegio Libertadores y María auxiliadora fueron dañados.

Figura 68 — Verificación de campo.



NOTA: En la imagen se puede apreciar la extracción de muestra del punto inicial del tramo a investigar y en donde ocurrió los desbordes fluviales.

Figura 69 — Exploración de campo Km 339+200.



NOTA: En la imagen se puede apreciar la extracción de muestra del punto N° 01 del tramo a investigar y en donde ocurrió los desbordes fluviales en el km 339+550.

Figura 70 — Exploración de campo punto N° 01, en el Km 339+550.



NOTA: En la imagen se puede apreciar la extracción de muestra del talud que esta adyacente a la vía interoceánica en el punto N° 08 del tramo a investigar y en donde existe la socavación en el Km 342+000.

Figura 71 — Exploración de campo progresiva Km 342+000.



NOTA: En la imagen se puede apreciar la extracción de muestra del talud que esta adyacente a la vía interoceánica en el punto N° 09 del tramo a investigar y en donde existe la socavación en el Km 342+000.

Figura 72 — Socavación crecidas del río en la progresiva Km 342+200.



NOTA: En la imagen se puede apreciar la extracción de muestra del talud que esta adyacente a la vía interoceánica en el punto N° 07 del tramo a investigar y en donde existe la socavación en la progresiva Km 341+650.

Figura 73 — Exploración de campo en la progresiva Km 341+650.



NOTA: En la imagen se puede apreciar la extracción de muestra del talud que esta adyacente a la vía interoceánica en el punto N° 02 del tramo a investigar y en donde existe la socavación en la progresiva Km 339+900.

Figura 74 — Exploración de campo en la progresiva Km 339+900.



NOTA: En la imagen se puede apreciar la extracción de muestra del talud en la progresiva Km 340+250 en el punto N° 03 para su estudio correspondiente.

Figura 75 — Exploración de campo progresiva Km 340+250.



NOTA: En la imagen se puede apreciar la extracción de muestra del talud en la progresiva Km 341+300 en el punto N° 06 para su estudio correspondiente.

Figura 76 — Exploración de campo punto N° 06 en la progresiva Km 341+300.



NOTA: En la imagen se puede apreciar la verificación de la crecida de río y el caudal en el mes de febrero del 2025.

Figura 77 — Caudal de río Chalhuanca en el mes de febrero, 2025



NOTA: En la imagen se puede apreciar la extracción de muestra del talud en la progresiva Km 340+600 en el punto N° 04 para su estudio correspondiente y procesar en el laboratorio.

Figura 78 — Exploración de campo punto N° 04 en la progresiva Km 340+600.



NOTA: De la progresiva 341+680 km al 341+710 km 30m Socavación de predio en el margen izquierdo de Chuquina y margen derecho de Pairaca se constató la socavación de las viviendas que se encuentran al borde del cauce del río.

Figura 79 — Crecida y socavación del río progresiva Km 338+850.



NOTA: De la progresiva 340+950 km 341+110 km 160m como se muestra en la imagen se ve que fue afectada la vía y restaurada en el mes de mayo en el cual se realizaron los enrocados para restaurar el alineamiento de la vía.

Figura 80 — Disminución del caudal de río Chalhuanca mayo, 2025.



NOTA: Debido a los desbordes pluviales que ocurrieron en esta zona se puede observar los daños de la infraestructura vial y luego son restaurados.

Figura 81 — Verificación con dron de daños en la infraestructura vial.



NOTA: Se realizó el levantamiento topográfico con dron DJI MAVIC 3 ENTERPRISE de toda la cuenca que fueron afectados.

Figura 82 — Levantamiento de información con dron .



NOTA: Socavación de predio afectados en el centro poblado Chuquinga y Pairaca margen izquierdo y derecho en los cuales se encuentra en estado crítico con riesgo de colapsar.

Figura 83 — Crecida del río sector Chuquinga, data histórica.



NOTA: Se realizó la encuesta en cuestionario escala Likert de cinco puntos; validados por expertos con maestría en hidráulica o similares.

Figura 84 — Encuesta en el cuestionario en escala likert.



NOTA: En la imagen podemos observar el desbordamiento del río en la progresiva Km 339+200 hasta Km 339+750

Figura 85 — Desbordamiento del río.



NOTA: De la progresiva Km 340+950 hasta 341+110 con una longitud 160 m como se muestra en la imagen se ve que fue afectada la vía.

Figura 86 — Socavación y daños en la infraestructura vial.



NOTA: En la imagen se puede apreciar que existe daños por desbordes fluviales en la infraestructura vial y que estos daños generan el cese de la transitabilidad vehicular y de esa manera la paralización de la economía nacional.

Figura 87 — Desbordamiento en la infraestructura vial en el Km 339+200.



NOTA: En la imagen se puede apreciar que el desbordamiento del río generando daños en la infraestructura vial y paralización a nivel nacional del transporte.

Figura 88 — Desbordamiento en la infraestructura vial en el Km 340+950.

CERTIFICADOS.



Arsou Group
Laboratorio de Metrología

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN
N° LMA-207-2025

Página 1 de 3

Fecha de emisión	2025/08/06
Solicitante	ECX - INGENIEROS E.I.R.L.
Dirección	JR. LOS LIROS NRO. SN URB. PATIBAMBA BAJA (A UNA CDRA DE FACULTAD VETERINARIA) APURIMAC - ABANCAY - ABANCAY
Instrumento de medición	BALANZA
Identificación	NO INDICA
Intervalo de indicación	30000 g
División de escala Resolución	1 g
División de verificación (e)	1 g
Tipo de indicación	Digital
Marca / Fabricante	OHAUS
Modelo	R21P30
N° de serie	8390110628
Procedencia	ESTADOS UNIDOS
Ubicación	Laboratorio de suelos
Lugar de calibración	Instalaciones del cliente
Fecha de calibración	2025/08/06
Método/Procedimiento de calibración	"Procedimiento para la Calibración de Balanzas de Funcionamiento no Automático Clase III y IIII" (PC-001) del SNM-INDECOPI, 3era edición Enero 2009 y la Norma Metrológica Peruana "Instrumentos de Pesaje de Funcionamiento No Automático (NMP 003:2009)

Este certificado de calibración documenta la trazabilidad a patrones nacionales o internacionales, que realizan las unidades de medida de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI)

Los resultados son válidos en el momento de la calibración. Al solicitante le corresponde disponer en su momento recalibrar sus instrumentos a intervalos regulares, los cuales deben ser establecidos sobre la base de las características propias del instrumento, sus condiciones de uso, el mantenimiento realizado y conservación del instrumento de medición o de acuerdo a reglamentaciones vigentes.

ARSOU GROUP S.A.C. no se responsabiliza de los perjuicios que pueda ocasionar el uso inadecuado de este instrumento después de su calibración, ni de una incorrecta interpretación de los resultados de la calibración declarados en este documento.

Este certificado no podrá ser reproducido o difundido parcialmente, excepto con autorización previa por escrito de ARSOU GROUP S.A.C.



ARSOU GROUP S.A.C.
[Signature]
Joshua S. S. S. S. S.

Figura 89 — Certificado de calibración “balanza” parte 1.



Arsou Group
Laboratorio de Metrología

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN
Laboratorio de Calibración según ISO/IEC 17025:2017

1. DATOS GENERALES DEL CERTIFICADO

Certificado N°	ECX-BAL-2025-B6568
Expediente N°	ECX-MET-026
Fecha de calibración	08/01/2025
Número de páginas	3

ARSOU GROUP S.A.C.

Joseph Antonio Romero Flores
Metrología

2. IDENTIFICACIÓN DEL INSTRUMENTO

Instrumento	Balanza de precisión
Marca / Fabricante	ARSOU
Modelo	APS-3000
Número de serie	APS-01-2568
Resolución	0.01 g
Capacidad máxima	3000 g
Tipo de balanza	Electrónica de precisión
Código de identificación	ECX-B-03
Ubicación	Laboratorio de Mecánica de Suelos – ECX LAB

3. DATOS DEL CLIENTE

Cliente	ECX Ingenieros E.I.R.L.
Dirección	Abancay – Apurímac
Área usuaria	Laboratorio de Suelos y Concreto

4. CONDICIONES AMBIENTALES DE CALIBRACIÓN

La calibración se realizó bajo condiciones ambientales controladas, con el fin de minimizar la influencia de factores externos sobre las mediciones.

Parámetro	Valor medio	Variación	Unidad
Temperatura ambiente	22.0	±0.5	°C
Humedad relativa	60		%

ARSOU GROUP S.A.C.
Asoc. Viv. Las Flores de San Diego Mz C Lote 01, San Martín de Porres, Lima, Perú
Telf.: +51 301-1681 / Cel.: +51 928 196 794
ventas@arsougroup.com
www.arsougroup.com




Figura 90 — Certificado de calibración “balanza” parte 2.

5. TRAZABILIDAD METROLÓGICA

Las mediciones realizadas son trazables al Sistema Internacional de Unidades (SI), mediante el uso de pesas patrón calibradas en laboratorios acreditados, con cadena de trazabilidad vinculada al Instituto Nacional de Calidad (INACAL).

Código	Patrón de referencia	Certificado de calibración
P-100	Pesa patrón 100 g clase M1	INACAL-2025-0145
P-500	Pesa patrón 500 g clase M1	INACAL-2025-0146

6. MÉTODO DE CALIBRACIÓN

La calibración de la balanza se efectuó mediante el método de comparación directa, aplicando cargas conocidas con pesas patrón sobre el platillo de la balanza. Las lecturas se realizaron una vez alcanzada la estabilización del instrumento, siguiendo buenas prácticas metrológicas y procedimientos internos del laboratorio.

7. RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN

Carga nominal (g)	Masa patrón (g)	Indicación de la balanza (g)	Error (g)	Error permitido (g)	Conformidad
100	100.00	100.01	+0.01	±0.02	Conforme
500	500.00	499.99	-0.01	±0.02	Conforme
1000	1000.00	1000.01	+0.01	±0.02	Conforme

8. INCERTIDUMBRE DE MEDICIÓN

La incertidumbre expandida de la medición fue evaluada considerando las fuentes principales de incertidumbre, tales como la repetibilidad de la balanza, la incertidumbre de las pesas patrón, la resolución del instrumento y las condiciones ambientales. El valor reportado corresponde a una incertidumbre expandida con factor de cobertura $k = 2$, lo que proporciona un nivel de confianza aproximado del 95 %.

ARSOU GROUP S.A.C.

Asoc. Viv. Las Flores de San Diego Mz C Lote 01, San Martín de Porres, Lima, Perú

Tel.: +51 301-1681 / Cel.: +51 928 196 794

ventas@arsougroup.com

www.arsougroup.com

ARSOU GROUP S.A.C.

Justo Flores
Justo Flores
Metrología



Figura 91 — Certificado de calibración “balanza” parte 2.

1. DATOS GENERALES DEL CERTIFICADO

Expediente N° ARSOU-TEMP-2025-H2564
 Fecha de calibración 08/06/2025
 Número de páginas 2
 Lugar de calibración ARSOU GROUP



2. DATOS DEL INSTRUMENTO

Instrumento	Horno de laboratorio
Marca / Fabricante	ARSOU
Modelo	DHG-9070A
Número de serie	AR-9070-25641
Código de identificación	ECX-H-99
Resolución	0.1 °C
Rango de indicación	25 °C – 150 °C
Elemento sensor	Sensor metálico integrado

3. DATOS DEL CLIENTE

Cliente	ECX Ingenieros E.I.R.L.
Dirección	Abancay – Apurímac

ARSOU GROUP S.A.C.

Asoc. Viv. Las Flores de San Diego Mz C Lote 01, San Martín de
 Porres, Lima, Perú
 Telf.: +51 301-1681 / Cel.: +51 928 196 794
 ventas@arsougroup.com
 www.arsougroup.com

ARSOU GROUP S.A.C.

 José Luis Flores
 Metrología

Figura 92 — Certificado de calibración “balanza” parte 2.

4. CONDICIONES AMBIENTALES

Parámetro	Media	Variación	Unidad
Temperatura ambiental	21.8	± 0.5	$^{\circ}\text{C}$
Humedad relativa	58	± 3	%



5. MÉTODO DE CALIBRACIÓN

La calibración se realizó mediante el método de comparación directa, empleando un termómetro patrón digital calibrado y trazable al Sistema Internacional de Unidades (SI). El procedimiento aplicado corresponde a prácticas internas basadas en ISO/IEC 17025.

6. RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN

Temp. de trabajo ($^{\circ}\text{C}$)	Temp. patrón ($^{\circ}\text{C}$)	Máx. ($^{\circ}\text{C}$)	Mín. ($^{\circ}\text{C}$)	Media ($^{\circ}\text{C}$)	Estabilidad ($^{\circ}\text{C}$)
110	109.9	110.2	109.7	109.95	0.25
150	149.8	150.3	149.6	149.95	0.35
200	199.7	200.4	199.5	199.95	0.45

7. INCERTIDUMBRE DE MEDICIÓN

La incertidumbre expandida fue estimada conforme a la Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medición (GUM), con un factor de cobertura $k = 2$, lo que corresponde a un nivel de confianza aproximado del 95 %.

ARSOU GROUP S.A.C.

Asoc. Viv. Las Flores de San Diego Mz C Lote 01, San Martín de Porres, Lima, Perú
Telf.: +51 301-1681 / Cel.: +51 928 196 794
ventas@arsougroup.com
www.arsougroup.com

ARSOU GROUP S.A.C.
[Signature]
José Manuel Flores
Metrología

Figura 93 — Certificado de calibración “balanza” parte 2.

Patrones e Instrumentos auxiliares

Trazabilidad	Patrón Utilizado	Certificado de Calibración
CADENT S.A.C.	Juego de Pesas de 1g a 1kg	1513-LM-2024
CADENT S.A.C.	Pesa Patrón de 5kg	1514-LM-2024
PESATEC PERÚ S.A.C.	Pesa Patrón de 10 kg	1590-MPES-C-2024
PESATEC PERÚ S.A.C.	Pesa Patrón de 20kg	1591-MPES-C-2024

Condiciones ambientales durante la calibración

Temperatura Ambiental	Inicial: 20 °C	Final: 20 °C
Humedad Relativa	Inicial: 17 %hr	Final: 17 %hr
Resultados		

ENSAYO DE REPETIBILIDAD

Medición N°	Carga L1= 15000 g			Carga L1= 30000 g		
	I (g)	ΔL (g)	E (g)	I (g)	ΔL (g)	E (g)
1	14998	0.006	0.004	29995	0.001	0.003
2	14998	0.002	0.003	29995	0.003	0.005
3	14998	0.005	0.006	29995	0.002	0.004
4	14998	0.002	0.004	29995	0.004	0.006
5	14998	0.003	0.008	29995	0.006	0.002
6	14999	0.006	0.002	29999	0.007	0.004
7	14999	0.002	0.004	29999	0.005	0.007
8	14999	0.001	0.003	29999	0.003	0.008
9	14999	0.003	0.002	29999	0.002	0.006
10	14999	0.005	0.002	29999	0.003	0.004
Carga (g)	Diferencia Máxima Encontrada (g)		Error Máximo Permitido (g)			
14999	0		1			
29999	0		5			



ARSOU GROUP S.A.C.
P.I. Flores
Jorge Flores
Arsou Group S.A.C.

Figura 94 — Certificado de calibración “balanza” parte 2.

ENSAYO DE EXCENRICIDAD

Posición de la Carga	Determinación de E_0				Determinación de E_0				
	Carga Min ⁽¹⁾ (g)	I (g)	ΔL (g)	E_0 (g)	Carga L (g)	I (kg)	ΔL (g)	E (g)	E_c (g)
1	500	500	0.003	0.002	10000	9999	0.007	0.005	0.002
2		500	0.002	0.006		10002	0.005	0.004	-0.001
3		500	0.001	0.002		9997	0.004	0.006	-0.002
4		500	0.002	0.009		9994	0.006	0.002	0.004
5		500	0.005	0.008		9999	0.005	0.004	-0.001

ENSAYO DE PESAJE

Carga L (g)	Crecientes				Decrecientes				EMP ⁽²⁾ (±g)
	I (g)	ΔL (g)	E (g)	E_c (g)	I (g)	ΔL (g)	E (g)	E_c (g)	
1	1	0.002	0.004	0.005					
5	5	0.006	0.001	0.004	5	0.005	0.003	0.002	0.1
10	10	0.003	0.002	0.006	10	0.006	0.007	-0.001	0.1
50	50	0.008	0.005	-0.003	50	0.002	0.005	-0.003	0.1
100	100	0.005	0.008	0.003	100	0.004	0.002	-0.001	0.1
500	500	0.007	0.002	0.004	500	0.002	0.003	0.001	0.2
1000	1000	0.002	0.004	-0.002	1000	0.006	0.002	0.004	0.2
5000	4999	0.004	0.003	0.001	4999	0.003	0.006	0.003	0.5
10000	9999	0.009	0.008	-0.001	9999	0.004	0.002	0.009	0.5
20000	19999	0.004	0.005	0.006	19999	0.002	0.005	0.005	0.5
30000	29999	0.003	0.008	0.009	29999	0.008	0.006	0.003	0.5

Legenda

I: Indicación de la balanza

ΔL : Carga Incrementada

E: Error encontrado

E_0 : Error en cero

E_c : Error corregido

EMP: Error máximo permitido

INCERTIDUMBRE EXPANDIDA Y LECTURA CORREGIDA

Incertidumbre expandida de medición $U_R = 2 \cdot \sqrt{0.26570 \text{ g}^2 + 0.000000006211 \text{ R}^2}$

Lectura Corregida $R_{\text{corregida}} = R + 0.838676555 \text{ R}$

R: Indicación de lectura de balanza (g)

Observaciones

1. Antes de la calibración no se realizó ningún tipo de ajuste.
2. Los EMP para esta balanza, corresponden para balanzas en uso de funcionamiento no automático de clase de exactitud II según la Norma Metrológica Peruana NMP 003:2009
3. La incertidumbre de la medición ha sido calculada para un nivel de confianza de aproximadamente del 95 % con un factor de cobertura $k=2$.
4. (*) Código indicado en una etiqueta adherida al instrumento.
5. Con fines de identificación se colocó una etiqueta autoadhesiva con la indicación "CALIBRADO"

Fin de documento

ARSOU GROUP S.A.C.
José P. Flores Flores
Metrología

Figura 95 — Certificado de calibración "balanza" parte 3.



CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN
N° LMA-207-2025

CERTIFICADO DE CALIBRACION DE TAMICES

LABORATORIO: ECX LAB – Laboratorio de Mecánica de Suelos y Materiales

RESPONSABLE TÉCNICO:

Ing. Edison Ponce Torres

CERTIFICADO N°: ECX-CAL-TAM-001-2026

FECHA DE CALIBRACIÓN: 08 / 06 / 2026

FECHA DE EMISIÓN: 08 / 06 / 2026

LUGAR: Instalaciones de ECX LAB

1. IDENTIFICACIÓN DEL EQUIPO

Equipo: Tamices para Mecánica de Suelos

Norma de referencia: ASTM E11 / ISO 3310-1

Material: Acero inoxidable

Estado: Apto para uso

2. TAMICES CALIBRADOS –

3",- 2"- 1 1/2"- 1"- 3/4"- 1/2"- 3/8"- N° 4- N° 10- N° 40- N° 200

3. MÉTODO DE CALIBRACIÓN

La calibración se realizó mediante inspección visual, verificación dimensional de la abertura y comparación con patrones de referencia, conforme a las normas ASTM E11 e ISO 3310-1.

4. RESULTADOS

Los tamices evaluados cumplen con las tolerancias establecidas por las normas vigentes, por lo que se consideran APTOS PARA USO en ensayos de Mecánica de Suelos.

5. VIGENCIA

La vigencia de este certificado es de 12 meses a partir de la fecha de calibración.



6. OBSERVACIONES

Este certificado es válido únicamente para los equipos evaluados y pierde validez si los tamices presentan deformaciones o daños posteriores.

APROBACIÓN:

ARSOU GROUP S.A.C.
[Signature]
José Carlos Arcevaldo Flores

Figura 96 — Certificado de calibración “tamices”.





CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN
N° LMA-207-2025

CERTIFICADO DE CALIBRACION DE EQUIPO CASAGRANDE

CERTIFICADO N°: ECX-CAL-CAS-071-2025

FECHA DE CALIBRACIÓN: 08 / 06 / 2025

FECHA DE EMISIÓN: 08 / 06 / 2025

LUGAR DE CALIBRACIÓN: Instalaciones de ECX LAB

1. IDENTIFICACIÓN DEL EQUIPO

Equipo: Aparato de Casagrande

Uso: Determinación del Límite Líquido de suelos

Norma de referencia:

- ASTM D4318 – Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils

- AASHTO T 89

Fabricante: ARSOU GROUP

Modelo / Serie: MCA445

Material del equipo: Metálico

Estado físico: Bueno / Operativo

2. ALCANCE DE LA CALIBRACIÓN

La calibración del equipo Casagrande tuvo como finalidad verificar el correcto funcionamiento mecánico del dispositivo, asegurando que los resultados obtenidos durante la determinación del Límite Líquido de suelos sean confiables, repetibles y técnicamente válidos.

3. MÉTODO DE CALIBRACIÓN

La calibración se realizó conforme a los procedimientos establecidos en las normas ASTM D4318 y AASHTO T 89, considerando los siguientes aspectos:

- Verificación de la altura de caída del cucharón (10 ± 0.2 mm).
- Revisión del mecanismo de leva y eje de rotación.
- Inspección del desgaste del cucharón.
- Evaluación de la base de apoyo y superficie de impacto.
- Comprobación de estabilidad y nivelación del equipo.
- Ensayo de funcionamiento repetitivo del sistema.



ARSOU GROUP S.A.C.
[Signature]
José Antonio Arroyo Flores
Asesor Técnico

Figura 97 — Certificado de calibración “casagrande” parte 1.



CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN
N° LMA-207-2025

4. INSTRUMENTOS UTILIZADOS

- Regla metálica milimetrada
- Calibrador vernier
- Nivel de burbuja
- Herramientas manuales de ajuste

Los instrumentos utilizados se encuentran verificados internamente y en condiciones adecuadas para su uso en actividades de control y verificación.

5. RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN

De la verificación efectuada se concluye que:

- La altura de caída del cucharón se encuentra dentro de los rangos permisibles.
- El mecanismo de accionamiento funciona de manera uniforme y continua.
- No se observaron deformaciones ni desgastes que afecten el desempeño del equipo.

Por lo tanto, el equipo Casagrande evaluado se considera:

>>> APTO PARA USO <<<

en la determinación del Límite Líquido de suelos, conforme a normas técnicas vigentes.

6. TRAZABILIDAD Y CONFIABILIDAD

La calibración fue realizada bajo procedimientos técnicos internos del laboratorio ECX LAB.

Este certificado es válido únicamente para el equipo evaluado y bajo las condiciones existentes al momento de la calibración.

7. VIGENCIA

Vigencia recomendada del certificado: 12 meses

8. OBSERVACIONES

- El presente certificado pierde validez si el equipo es sometido a golpes, modificaciones mecánicas o uso inadecuado.
- No se permite la reproducción parcial de este documento sin autorización del laboratorio.

9. APROBACIÓN



ARSOU GROUP S.A.C.
P.I. *[Signature]*
José P. Antonio Arevalo Flores
Analista de M&A

Figura 98 — Certificado de calibración “casagrande” parte 2.





CERTIFICADO DE OPERATIVIDAD Y FUNCIONAMIENTO

N° 0005-2024

CLIENTE : TOPTec E.I.R.L
EQUIPO : Drone
MARCA : DJI
MODELO : DJI MAVIC 3 ENTERPRISE
SERIE : 1581F5FHC245D00DKJ5P

FECHA DE REVISIÓN : 06/11/2024

FECHA DE VENCIMIENTO: 06/11/2025

ARINSA DRONES Y SERVICIO DE INGENIERIA S.A.C. Certifica que el equipo se encuentra en óptimas condiciones de operatividad y cumple con:

- Firmware y Software actualizados de Drone y Control
- Cámara calibrada
- IMU Calibrado
- Joystick de control calibrado
- Totalmente operativo

Por tanto, el equipo se encuentra en funcionamiento OPERATIVO.

Se expide el siguiente documento para los fines que el cliente vea conveniente.



Servicio Técnico
ARINSA DRONES Y SERVICIO
DE INGENIERIA S.A.C.

Cusco 06 de noviembre del 2024

980847043 / 941971973
/arinsadrones

Edificio El Roble, oficina 402
Av. Micaela Bastidas N° 443 – Wanchaq
Cusco

ventas@arinsa.pe
servicios@arinsa.pe
capacitaciones@arinsa.pe

Figura 99 — Certificado de operatividad y funcionamiento del DRONE.



BRANDY G. LEÓN RAMIREZ
GERENTE GENERAL
TOPTEC E.I.R.L.

Figura 100 — Acreditación transitoria de operador piloto de RPAS.

ANEXO F: DECLARATORIA DE ORIGINALIDAD DEL AUTOR

DECLARACION DE ORIGINALIDAD DEL AUTOR

Yo, Jose Armando Condori Arone, identificado con DNI: 70921771, egresado de la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac – UNAMBA, con domicilio legal Av. Brilla el sol, del distrito de Abancay, provincia Abancay, Apurímac.

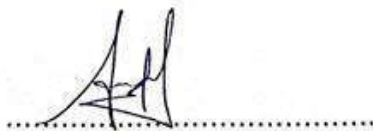
Declaro bajo juramento que:

Todos los datos e información que acompañan a la tesis titulado: “Análisis hidrodinámico para determinar la vulnerabilidad de la infraestructura vial ante desbordes fluviales en el tramo km 339+200 al 343+200 del río Chalhuanca, Apurímac, 2025”, es de mi autoría; por lo tanto, declaro que la tesis:

- No a sido plagiado ni total, ni parcialmente.
- He mencionado todas las fuentes empleadas, identificando correctamente toda la cita textual o de paráfrasis proveniente de otras fuentes.
- No ha sido publicado ni presentado anteriormente para la obtención de otro grado académico o título profesional.
- Los datos presentados en los resultados no han sido falseados, ni duplicados, ni copiados.

en tal sentido asumo la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de información aportada; por consiguiente, me someto a lo dispuesto en las normas académicas vigentes de la Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac.

Tamburco, 18 de noviembre del 2025.



Jose Armando Condori Arone

DNI: 70921771

Figura 101 — Declaratoria de originalidad del autor.

ANEXO G: AUTORIZACION DE CONSENTIMIENTO PARA REALIZAR LA INVESTIGACION



MUNICIPALIDAD PROVINCIAL DE AYMARAE
GERENCIA DE DESARROLLO TERRITORIAL E INFRAESTRUCTURA
"Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana"



CARTA N° 308-2025 - MPA - GDTI/NCV

Chalhuanka, 20 de noviembre del 2025

Señor : José Armando Condori Arone
Estudiante de Ingeniería Civil
Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac

Presente.-

Asunto : RESPUESTA A LO SOLICITADO

De mi consideración:

Es grato dirigirme a usted para saludarlo cordialmente y, a la vez, en atención a su solicitud de autorización para la realización de actividades de campo en el tramo del río Chalhuanka, comprendido entre los km 339+200 al km 343+200, informarle lo siguiente:

Luego de la evaluación técnica correspondiente, se precisa que las áreas solicitadas, específicamente los tramos del km 341 al km 343, se encuentran actualmente bajo la administración del Gobierno Regional de Apurímac, en el marco de la ejecución de la obra denominada:

"Mejoramiento del Servicio de Protección y Gestión de Riesgo contra Inundaciones en 3.240 km del cauce del río Chalhuanka, distrito de Chalhuanka, provincia de Aymaraes, región Apurímac".

En tal sentido, la Municipalidad Provincial de Aymaraes no cuenta con competencia directa para autorizar intervenciones o actividades dentro de dicho tramo del río, por lo que corresponde que su solicitud sea tramitada ante el Gobierno Regional de Apurímac, entidad que administra y ejecuta el citado proyecto.

No obstante, se autoriza la realización de trabajos de campo en el tramo comprendido entre los km 339+200 al km 341+000, por encontrarse bajo la competencia y jurisdicción de la Municipalidad Provincial de Aymaraes.

Por lo expuesto, se le recomienda efectuar las gestiones correspondientes ante la entidad regional competente, a fin de obtener la autorización respectiva para los tramos bajo su administración.

Sin otro particular, hago propicia la ocasión para expresarle los sentimientos de mi especial consideración.

Atentamente,

Ing. Nefelí Cruz Valenzuela
GERENTE DE INFRAESTRUCTURA
Y DESARROLLO TERRITORIAL

GESTIÓN 2023-2026

Figura 102 — Autorización de consentimiento para realizar la investigación.

ANEXO H: OTROS

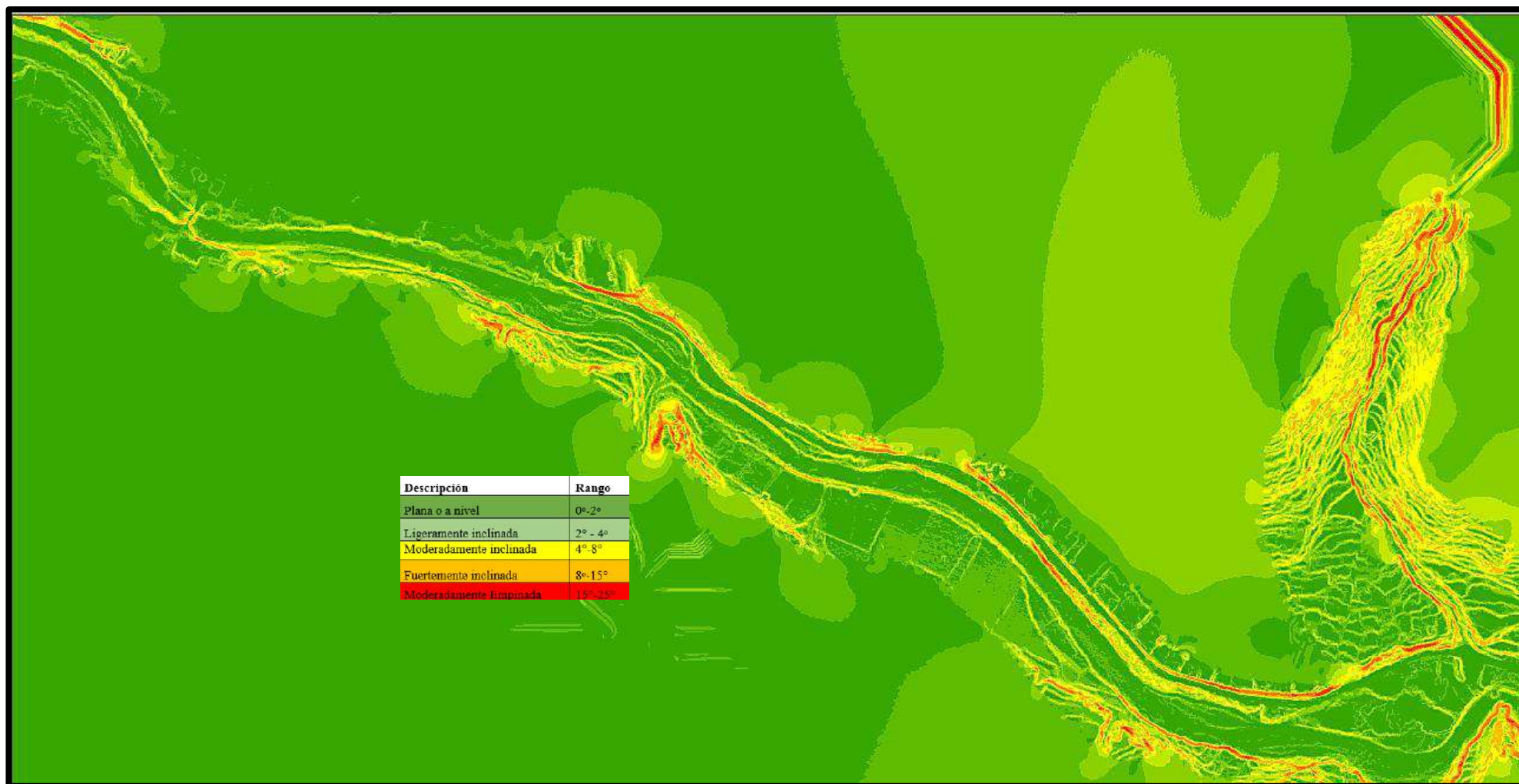


Figura 103 — Plano de pendientes con rango de colores.

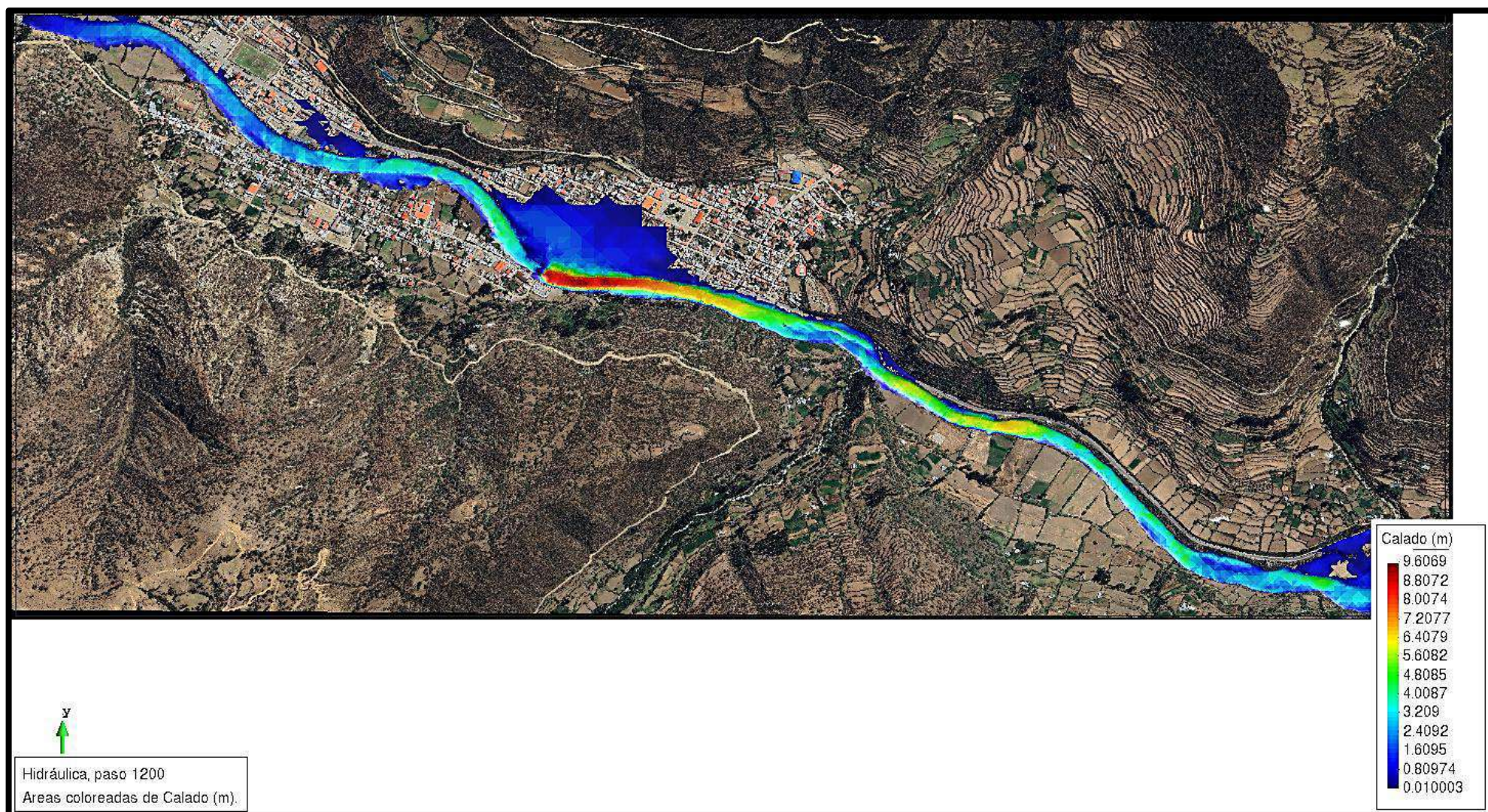


Figura 104 — Variación de profundidad o calado.

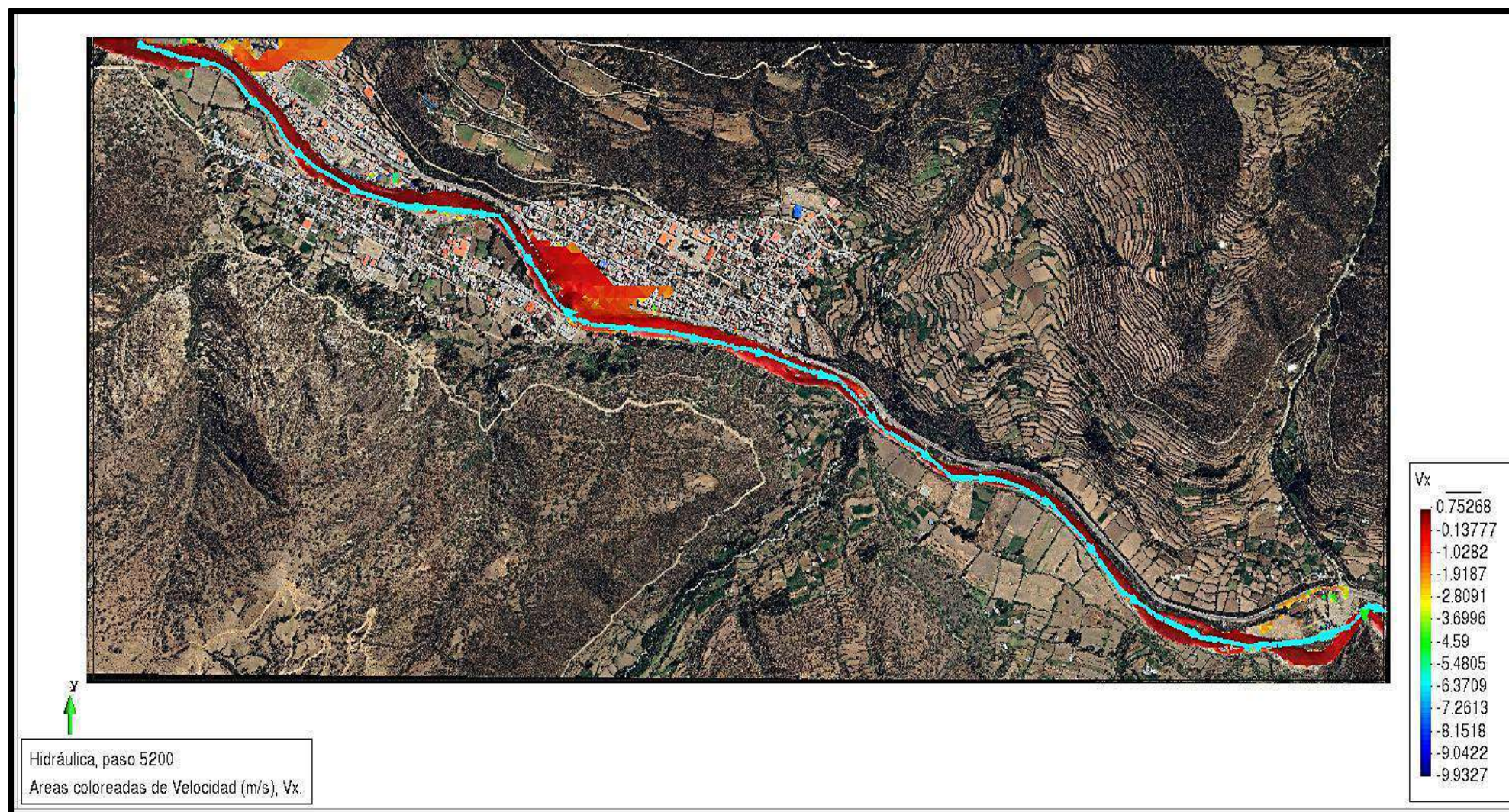


Figura 105 — Velocidad del flujo en dirección X (V_x) – paso 1200

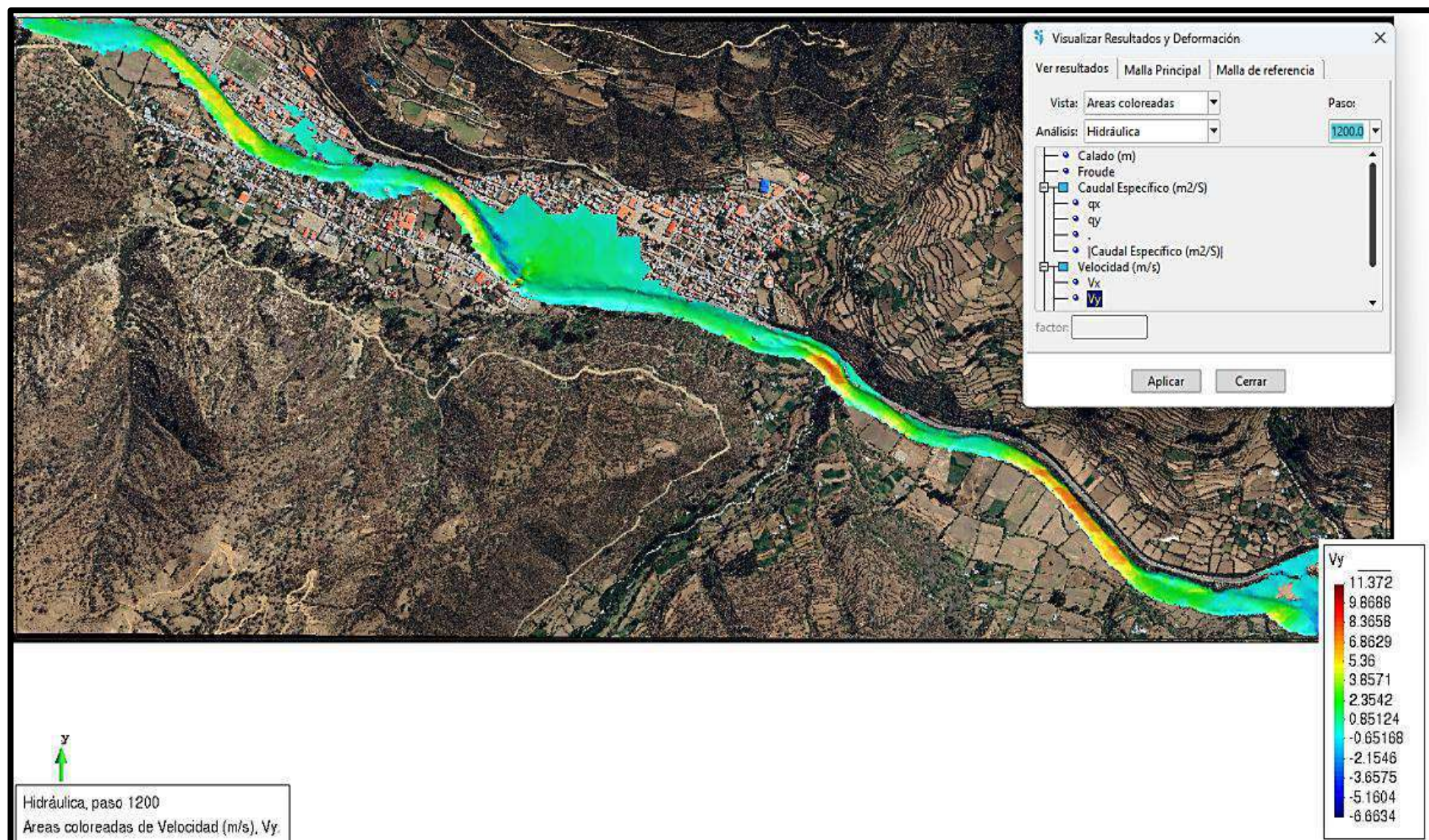


Figura 106 — Velocidad del flujo en dirección Y (Vy)

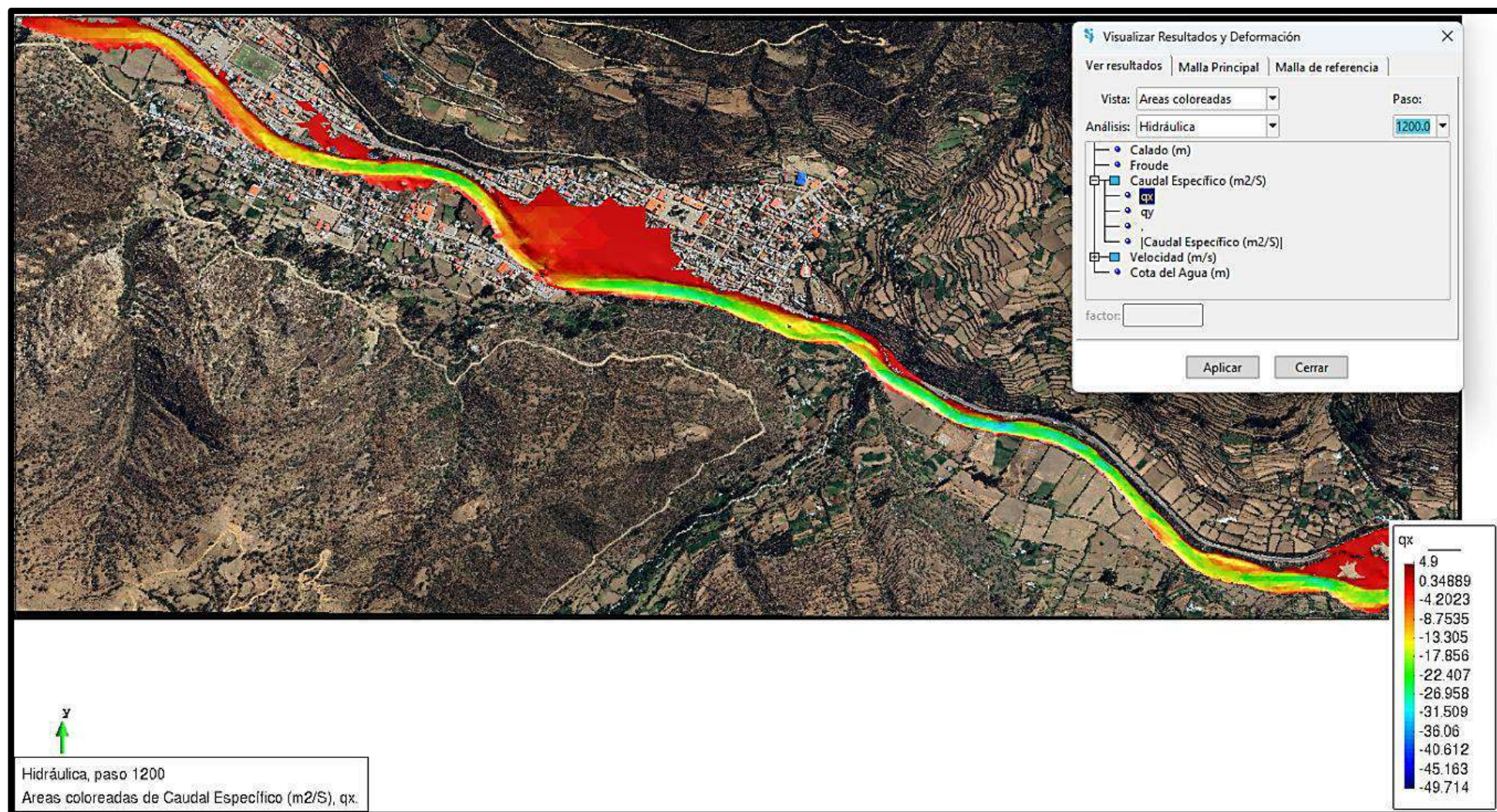


Figura 107 — Distribución del caudal específico en dirección X (qx)

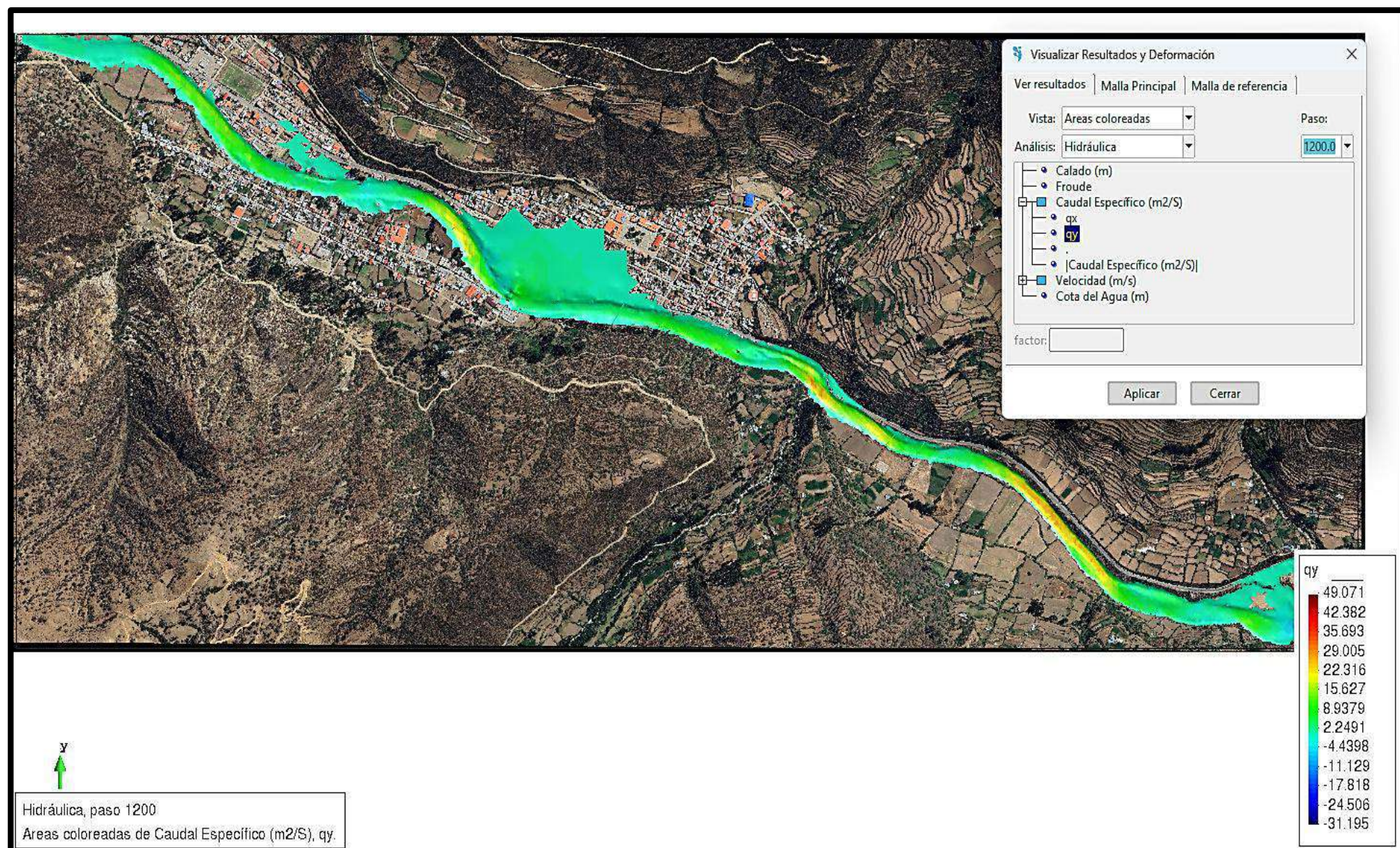


Figura 108 — Distribución del caudal específico en dirección Y (qy)