

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
Escuela Profesional de Ingeniería Civil



**Creación del gemelo digital de infraestructura vial en base a
fotogrametría**

Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Civil

Autor:

Roly Elvis Huarsaya Soncco
Pedro Juan Mayhua Mayhua

Asesor:

Mg. Edwin Parillo Escarsena

Juliaca, mayo de 2024

DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD DE TESIS

Yo Mg. Edwin Parillo Escarsena, docente de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Civil, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que la presente investigación titulada: **“CREACIÓN DEL GEMELO DIGITAL DE INFRAESTRUCTURA VIAL EN BASE A FOTOGRAMETRÍA”** de los autores **Roly Elvis Huarsaya Soncco** y **Pedro Juan Mayhua Mayhua** tiene un índice de similitud de 18 % verificable en el informe del programa Turnitin, y fue realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

En tal sentido asumo la responsabilidad que corresponde ante cualquier falsedad u omisión de los documentos como de la información aportada, firmo la presente declaración en la ciudad de Juliaca, a los 20 días del mes de mayo del año 2024.



Mg. Edwin Parillo Escarsena
Asesor

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS



En Puno, Juliaca, Villa Chullunquiani, a 20 día(s) del mes de mayo del año 2027, siendo las 14:00 horas, se reunieron los miembros del jurado en la Universidad Peruana Unión Campus Juliaca, bajo la dirección del (de la) presidente(a):

Ing. Herson Dubovsky Páez Cusi, el (la) secretario(a): Mtro. Leonel Chahuariz Paucar y los demás miembros: Mg. Arnaldo Cahui Galarza y el (la) asesor(a) Mg. Edwin Parillo Escorsena

con el propósito de administrar el acto académico de sustentación de la tesis titulado: Creación del gemelo digital de infraestructura vial en base a fotogrametría

del(los) bachiller(es): a) Pedro Juan Mayhua Mayhua
b) Roly Elvis Huarsaya Sorcco
c)

conducente a la obtención del título profesional de: Ingeniero Civil
(Denominación del Título Profesional)

El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s hacer uso del tiempo determinado para su exposición. Concluida la exposición, el Presidente invitó a los demás miembros del jurado a efectuar las preguntas, y aclaraciones pertinentes, las cuales fueron absueltas por al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s. Luego, se produjo un receso para las deliberaciones y la emisión del dictamen del jurado. Posteriormente, el jurado procedió a dejar constancia escrita sobre la evaluación en la presente acta, con el dictamen siguiente:

Bachiller (a): Pedro Juan Mayhua Mayhua

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
<u>Aprobado</u>	<u>17</u>	<u>B+</u>	<u>Muy Bueno</u>	<u>Sobresaliente</u>

Bachiller (b): Roly Elvis Huarsaya Sorcco

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
<u>Aprobado</u>	<u>17</u>	<u>B+</u>	<u>Muy Bueno</u>	<u>Sobresaliente</u>

Bachiller (c):

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	

(*) Ver parte posterior

Finalmente, el Presidente del jurado invitó al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s a ponerse de pie, para recibir la evaluación final y concluir el acto académico de sustentación procediéndose a registrar las firmas respectivas.

Presidente/a: [Firma]
 Asesor/a: [Firma]
 Bachiller (a): [Firma]
 Secretario/a: [Firma]
 Miembro: [Firma]
 Bachiller (b): [Firma]
 Bachiller (c): [Firma]

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL	iv
ÍNDICE DE TABLAS	v
ÍNDICE DE FIGURAS	v
ÍNDICE DE ANEXOS	v
RESUMEN	6
ABSTRACT	7
I. INTRODUCCIÓN	8
II. DESARROLLO	8
A. Digitalización.....	8
B. Gemelo Digital	9
C. Gemelo Digital en ingeniería.....	9
D. Gemelo Digital frente a BIM.....	9
III. METODOLOGÍA.....	10
A. Adquisición y procesamiento de datos	11
B. Ajuste de alineación horizontal	12
C. Ajuste de alineación vertical.....	14
D. Procesamiento de secciones transversales	15
E. Hermanamiento digital	18
F. Evaluación de la condición de la carretera	18
IV. RESULTADOS	19
A. Procesamiento de datos	19
B. Alineación horizontal.	19
C. Alineación vertical.....	21
D. Sección transversal, hermanamiento digital.	22
E. Condición de la carretera.....	25
V. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....	27
CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES.....	27
REFERENCIAS	28

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA I	Diferencias entre gemelo digital y BIM.....	10
TABLA II	Puntos de control en el ensamblaje y sus líneas de control correspondientes. ...	17
TABLA III	Clasificación de deterioros o Fallas de la condición de la carretera	18
TABLA IV	Parámetros de ajuste y evaluación de la alineación horizontal.....	20
TABLA V	Información de la alineación horizontal.....	20
TABLA VI	Parámetros de ajuste y evaluación de la alineación vertical.....	21
TABLA VII	Información de la alineación vertical.....	22
TABLA VIII	Parámetros de ajuste, evaluación de las alineaciones y asignación de restricciones.....	23
TABLA IX	Información de las secciones transversales típicas.....	24
TABLA X	Evaluación por tipo de deterioro o falla del pavimento flexible por secciones de 200m.....	25
TABLA XI	Evaluación de la condición y tipo de conservación de la carretera.....	26

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1.	Modelo de gemelo digital de cinco dimensiones.....	10
Fig. 2.	El flujo de trabajo general para el gemelo digital de la carretera.....	11
Fig. 3.	Ubicación de la carretera en el caso de estudio	11
Fig. 4.	Adquisición y procesamiento de datos y extracción de nubes de puntos de señalización vial horizontal.....	12
Fig. 5.	El flujo de trabajo del ajuste de alineación horizontal.....	12
Fig. 6.	Código Matlab para el ajuste por suavizado de spline y filtro de hampel para la alineación horizontal.....	13
Fig. 7.	Flujo de trabajo del ajuste de alineación vertical.....	14
Fig. 8.	Código Matlab para el ajuste por suavizado de spline y filtro de hampel para la alineación vertical.....	15
Fig. 9.	Flujo de trabajo del procesamiento de secciones transversales.....	16
Fig. 10.	El ensamblaje de la carretera y sus líneas de control correspondientes.....	17
Fig. 11.	Resultado del ajuste de alineación horizontal.....	19
Fig. 12.	Resultado del ajuste de alineación vertical.....	21
Fig. 13.	Ensamblaje de la carretera, restricciones y método de modelado.....	23
Fig. 14.	Secciones transversales del gemelo digital.....	24

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo A: Evidencia de sumisión del artículo en una revista de prestigio **¡Error! Marcador no definido.**

Anexo B: Copia de la resolución de inscripción del perfil de proyecto de tesis en formato artículo aprobado por el consejo de facultad correspondiente **¡Error! Marcador no definido.**

Anexo C: Instrumentos de recolección de datos **¡Error! Marcador no definido.**

Anexo D: Informe de procesamiento de fotografías aéreas **¡Error! Marcador no definido.**

Anexo E: Fotografías del levantamiento topográfico - fotogrametría. **¡Error! Marcador no definido.**

Anexo F: Fichas de evaluación de la condición del pavimento de la carretera.**¡Error!**
Marcador no definido.

Creación del gemelo digital de infraestructura vial en base a fotogrametría

Huarsaya, Roly E ¹, Mayhua, Pedro J ²

¹ (C) Universidad Peruana Unión (Juliaca-Puno, Perú). roly.huarsaya@upeu.edu.pe. ORCID: 0009-0001-9996-9326

² Universidad Peruana Unión (Juliaca-Puno, Perú). pedro.mayhua@upeu.edu.pe. ORCID: 0009-0002-8875-1775

RESUMEN

La gestión vial demanda información actualizada sobre el estado de las carreteras, pero las inspecciones in situ demandan mucho tiempo y personal profesional, lo que conlleva a costos elevados. El GD (Gemelo Digital) es un enfoque innovador en términos de gestión, inspección y evaluación de carreteras. El objetivo es crear un GD en base a fotogrametría para determinar las alineaciones, secciones transversales, carriles, bermas y taludes, enfocado en la evaluación de la condición de la carretera. El proceso consta de cinco pasos: adquisición y procesamiento de datos, ajuste de alineación horizontal, ajuste de alineación vertical, procesamiento de secciones transversales y hermanamiento digital. El método cuasi experimental permite la aplicación controlada de técnicas como el suavizado por spline y filtro de Hampel para garantizar precisión. En el caso de estudio de 10km de la carretera de primera clase de la Red Vial Nacional PE-34B de la ruta Juliaca - Azángaro en la región de Puno, Perú. Los resultados validan la eficacia del método con alta precisión y eficiencia ($RMSE = 0.37$; $R^2 = 1$ y $RMSE = 0.01$; $R^2 = 1$) para el ajuste de la alineación horizontal y vertical respectivamente. Aunque la carretera no cumple con las dimensiones de carril y berma, su estado es bueno y tiene algunos defectos menores que requieren mantenimiento rutinario y reconstrucción de bermas. Concluyendo en la creación del gemelo digital sin requerir encuestas de campo y cumpliendo con los estándares de la ingeniería vial y es aplicable a carreteras existentes y sin documentación.

Palabras clave: Gemelo digital; Fotogrametría; carretera; Suavizado de spline, Filtro de Hampel

Building digital twins of road infrastructure based on photogrammetry

ABSTRACT

Road management demands updated information on road conditions, but on-site inspections require a lot of time and professional personnel, leading to high costs. The GD (Digital Twin) is an innovative approach in terms of road management, inspection, and evaluation. The objective is Building a GD based on photogrammetry to determine alignments, cross-sections, lanes, shoulders, and slopes, focusing on road condition assessment. The process comprises five steps: data acquisition and processing, horizontal alignment fitting, vertical alignment fitting, cross-section processing, and digital twinning. The quasi-experimental method allows controlled application of techniques such as smoothing spline and Hampel filter to ensure accuracy. In the case study of a 10 km segment of the first-class road of the PE-34B National Road Network from Juliaca to Azángaro in the Puno region, Peru, the results validate the method's effectiveness with high precision and efficiency (RMSE = 0.37; $R^2 = 1$ and RMSE = 0.01; $R^2 = 1$) for horizontal and vertical alignment fitting, respectively. Although the road does not meet lane and shoulder dimensions, its condition is good, with minor defects requiring routine maintenance and shoulder reconstruction. This concludes the building of the digital twin without requiring field surveys and complying with road engineering standards, applicable to existing roads without documentation.

Keywords: Digital twin; Photogrammetry; road; Smoothing spline, Hampel filter.

I. INTRODUCCIÓN

La transformación digital ha introducido nuevas perspectivas a la gestión de infraestructuras viales, abarcando áreas como el mantenimiento, inspección, la evaluación sistemática y gestión de carreteras, pero la dependencia de la recopilación de información in situ sigue siendo un obstáculo, resultando en uso ineficiente de recursos económicos y profesionales. La incorporación de herramientas tecnológicas amplía las posibilidades de aplicar nuevas metodologías.

En la digitalización de carreteras existentes, Easa y Wang [1] presentan un modelo para estimar alineaciones verticales continuas utilizando curvas parabólicas con el método de mínimos cuadrados. Además, se introduce un método de aproximación basado en una spline cúbica que identifica las alineaciones (rectas, curvas o clotoideas) a partir de puntos [2], y representan mejor la alineación horizontal en una carretera existente en comparación a mínimos cuadrados y Lagrange [3].

En la creación de GD Jiang, et al. [4] logran con alta precisión crear el GD de la autopista A1(M) en el Reino Unido en base a datos de mapas digitales. En Maribor, Eslovenia se creó un GD para un acceso de 300 m, a partir de un modelo BIM (Building Information Modeling) y datos monitoreados [5]. También se realizó el hermanamiento digital de la geometría y características de la superficie de pavimento asfáltico con técnicas de localización y mapeo visual [6].

Las investigaciones anteriores no desarrollan los componentes primarios de la carretera en su totalidad y han pasado por alto la aplicación de la fotogrametría. El objetivo es crear el gemelo digital para una sección de la carretera de primera clase de la Red Vial Nacional (PE-34B) en base a fotogrametría y orientado a determinar la condición de los componentes primarios de la carretera sin encuestas de campo. Crear la nube de puntos del pavimento del área de estudio de 10 km, y extraer las marcas viales para obtener la alineación horizontal y vertical mediante ajustes por suavizado de spline y filtrado por hampel, finalmente realizar el ensamblaje y obtener las secciones transversales de la carretera.

El GD con un enfoque orientado a la evaluación de la condición de la carretera es una herramienta innovadora para mejorar procesos de infraestructuras viales [7, 8], reduciendo inspecciones in situ, y optimizar recursos. Aunque aún se encuentra en etapas tempranas de implementación en la industria [9].

II. DESARROLLO

A. Digitalización

Iglesias, et al. [10] definen la digitalización como un término que impulsa el desarrollo en varios campos. En la infraestructura vial, se aplican sistemas digitales desde la detección del estado de las

carreteras hasta la digitalización completa de autopistas [11], mejorando el intercambio de datos, monitoreo y la implementación de nuevas metodologías, utilizando drones y escáner láser [12].

B. Gemelo Digital

El GD representa virtualmente una realidad física mediante tecnologías como Big Data, Inteligencia Artificial, Cloud Computing y Machine Learning [13, 14]. Funcionan como activos virtuales que imita el comportamiento del activo físico [19], que permiten la toma de decisiones, simulaciones, análisis del comportamiento físico y obtener información en tiempo real mediante sensores [16], siendo la conexión entre un sistema físico complejo y su réplica digital de alta fidelidad [17].

C. Gemelo Digital en ingeniería

Un GD es una copia digital de un edificio o una infraestructura, con información desde planimetría hasta problemas de mantenimiento y operación [9]. respaldan las decisiones de ingeniería al integrar modelos, sensores, análisis, diagnóstico y pronóstico [18]. Siendo el puente entre lo físico y virtual, una interfaz entre el entorno interno (la organización) y el entorno externo (entorno operativo) [5].

1) ***Diferentes recursos de Datos para un gemelo digital:*** Crear un GD requiere el uso de dispositivos de recopilación de datos del mundo físico. La tecnología LiDAR (Light Detection And Ranging) utiliza pulsos de luz que rebotan en el terreno y objetos, generando una nube tridimensional de puntos capturando sus detalles al calcular la distancia con el tiempo de vuelo de estos pulsos [19, 20]. Esta tecnología se aplica en mapeos móviles, reconocimiento y digitalización de vías [21], y detectar el deterioro [22].

La fotogrametría, una técnica para reconstruir objetos tridimensionales a partir de fotografías aéreas [23, 24]; sin perturbar las actividades en el área de trabajo [25]. Los costos de vehículos aéreos no tripulados han disminuido [18]. La nube de puntos generada preserva la información geométrica de un espacio tridimensional [26, 27]. Los datos de fotogrametría y LiDAR tienen una buena relación [28].

D. Gemelo Digital frente a BIM

Un GD se compone de cinco partes principales: la parte física, que construye la parte virtual; la parte virtual que replica la parte física; las conexiones que permite la transferencia y el control de datos; los servicios como simulación, toma de decisiones, seguimiento y control del objeto físico; y los datos, que impulsan la mejora de servicios, productividad y confiabilidad del sistema en general [29].

El GD debe representar con precisión las geometrías y comportamientos [30]. Las conexiones transfieren los datos del objeto físico a la parte virtual, para simulaciones y análisis avanzados, aunque la retroalimentación no es obligatoria [31]. Tampoco es obligatorio que la parte virtual controle la contraparte física [32], pero sí debe brindar un servicio específico [29], como se muestra en la Fig. 1.



Fig. 1. Modelo de gemelo digital de cinco dimensiones.

Un modelo BIM es una representación digital de las características físicas de un objeto generado desde la concepción hasta la demolición [30]. Las comparaciones entre gemelo digital y BIM se muestran en la Tabla I.

TABLA I
DIFERENCIAS ENTRE GEMELO DIGITAL Y BIM.

Elementos	Gemelo Digital	Modelo BIM
Parte física	Si	No
Modelo virtual	Si	Si
Conexiones entre modelos físicos y virtuales	Si	No
Relación de gemelos entre la parte física y el modelo virtual	Si	No

III. METODOLOGÍA

- *Tipo de Investigación:* Aplicada; ya que se enfoca en crear Gemelos Digitales usando técnicas de suavizado de spline y filtrado de Hampel para las alineaciones de carreteras.
- *Enfoque de Investigación:* Cuantitativo; ya que implica el procesamiento de datos numéricos en el ajuste por suavizado de spline y el filtrado de Hampel para crear los Gemelos Digitales.
- *Diseño de Investigación:* Cuasi-Experimental; dado la aplicación controlada de técnicas (fotogrametría, ajustes de alineación) en una situación práctica, obteniendo datos y características de la carretera en condiciones no completamente aleatorias.
- *Nivel de la investigación:* Aplicativo Descriptivo, buscando crear un procedimiento práctico y describir los pasos específicos del hermanamiento digital en una muestra representativa de

10 km de la carretera de primera clase (PE-34B), los análisis son base para futuras aplicaciones en otras poblaciones.

El procedimiento se compone de cinco pasos, como se muestra en la Fig. 2. basado en datos de fotogrametría y estándares de diseño de ingeniería vial.



Fig. 2. El flujo de trabajo general para el gemelo digital de la carretera.

A. Adquisición y procesamiento de datos

El caso de estudio comprende a una sección de la carretera de primera clase de la Red Vial Nacional (PE-34B) de 353.78 km que conecta EMP. PE-3S (Calapuja) con EMP. PE-30C (Pte. Inambari). La muestra es de 10 km, con punto de inicio en la coordenada geográfica 19L 369170.51 E y 8323905.91 N (Km 17) al punto final en la coordenada geográfica 19L 371776.31 E y 8331160.94 N (Km 27), como se muestra en la Fig.3.

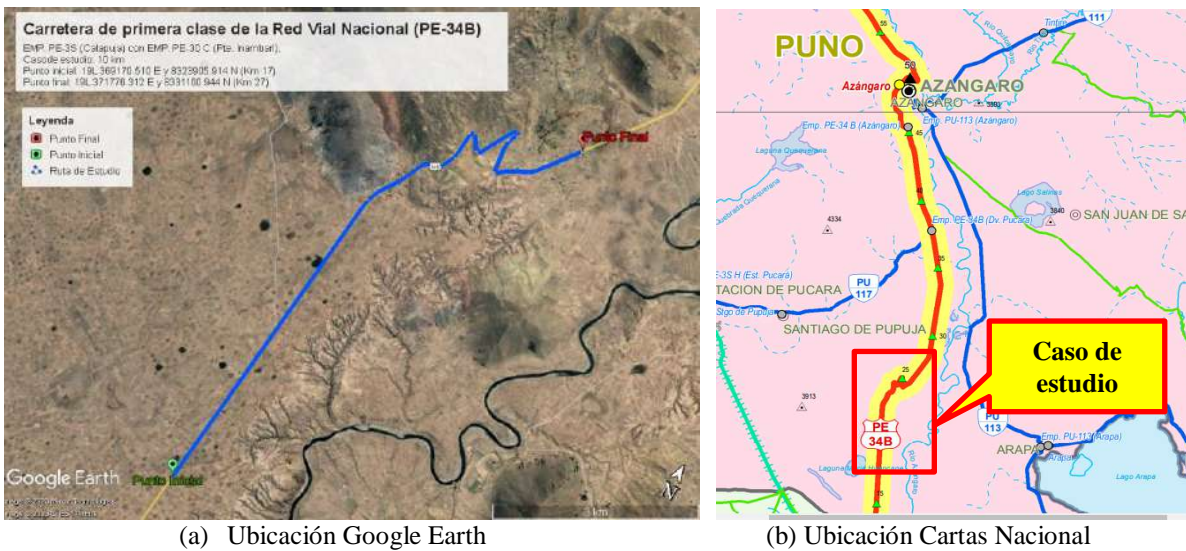
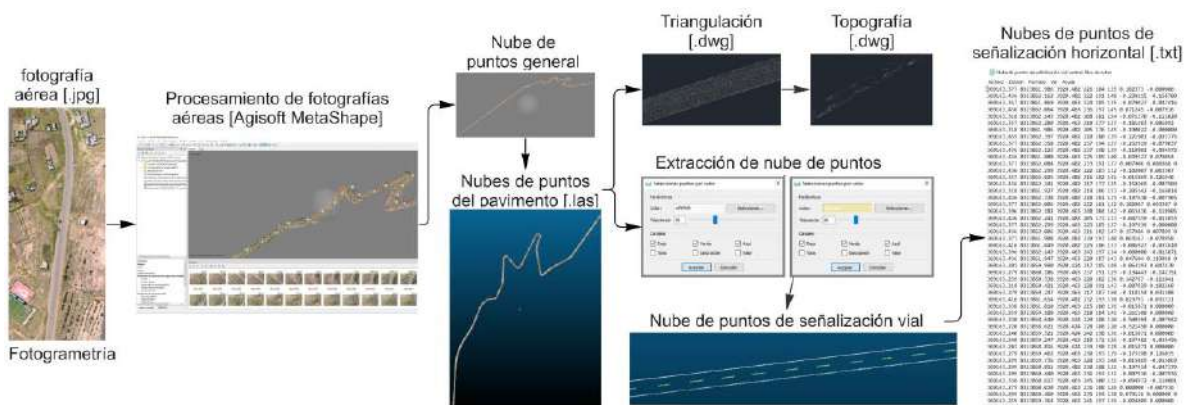


Fig. 3. Ubicación de la carretera en el caso de estudio

Los datos de campo se obtienen mediante fotogrametría con el dron Autel EVO II Pro V2 con sensor CMOS de 1 pulgada, modelo de cámara XT705 (10.57mm), 5472 x 3648 de resolución y el uso



de estación GPS diferencial Emlid reach RS2 para establecer los puntos de control y medir su posición, a cada 200m de la sección de estudio; el flujo para el procesamiento de datos se muestra en la Fig.4.

Fig. 4. Adquisición y procesamiento de datos y extracción de nubes de puntos de señalización vial horizontal.

las imágenes en formato (jpg) se georreferencia con los puntos de control y se genera la nube de puntos densa general en el software Agisoft MetaShape, en formato (las), se encierra y mantiene con una polilínea los puntos de la carretera y las pendientes laterales, al cual se denomina: la nube de puntos del pavimento en formato (las), luego se genera la triangulación y las curvas de nivel en civil 3D en formato (dwg). La nube de puntos de la línea de señalización vial horizontal se extrae con la herramienta clasificación de puntos por color con una tolerancia del 20% al 30%, aquellos puntos que no correspondan son reclasificadas en las categorías que les corresponde, también se eliminan los errores locales producidos por los automóviles, árboles, sombras, marcas viales cubiertas o con desgaste (menos es mejor que incorrecto). Finalmente se exporta en formato (txt), con coordenadas (x, y, z). para el ajuste por suavizado de spline en el software MatLab.

B. Ajuste de alineación horizontal

El procedimiento de ajuste de la alineación horizontal se presenta en la Fig. 5.

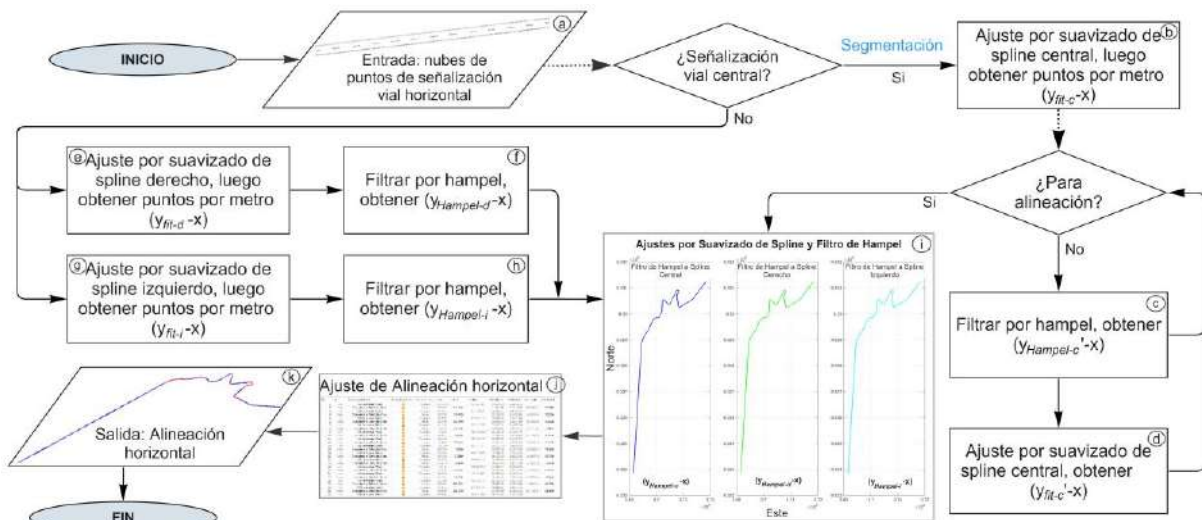


Fig. 5. El flujo de trabajo del ajuste de alineación horizontal.

Es adecuado usar el ajuste por suavizado de spline ya que considera pasar por todos los grupos de nubes de puntos y las pérdidas por errores locales no influyen en la tendencia general. El proceso inicia con la nube de puntos de señalización vial horizontal (a), es necesario realizar una segmentación para dividir los tramos rectos de los tramos con curvas y evitar tramos en paralelo. La marca vial central se ajusta por suavizado de spline mediante el código Matlab de la Fig.6. obtenido $y_{fit-c-x}$ que son los puntos del ajuste por metro a lo largo del eje x (b), si esta no presenta valores atípicos y picos en la imagen del

ajuste se establece la alineación horizontal, caso contrario se emplea el método filtro de Hampel que reemplaza los valores atípicos con la mediana con el código Matlab de la Fig. 6. que depende de la cantidad de datos y de un parámetro de ajuste “t”, donde se calcula la mediana de los datos vecinos y la Desviación Absoluta Mediana (MAD) para medir la dispersión de los datos; luego determinar “t” multiplicando MAD por 3 y un factor de 1.4826 que hace de la estimación imparcial para datos gaussianos, si un valor excede “t” se considera un valor atípico que se reemplaza por la mediana de los datos vecinos. Los datos filtrados se representan con $y_{Hampel-c}$ -x ③, si aún presenta valores atípicos se realiza un ajuste por suavizado de spline adicional (y_{fit-c} -x) ④, si lo requiere se repite el filtro de hampel y su posterior ajuste hasta que los datos sean adecuados para la alineación horizontal.

El mismo proceso se aplica a las marcas viales exteriores derecho (y_{fit-d} -x) ⑤ e izquierdo (y_{fit-i} -x) ⑥, luego se emplea el filtro de hampel para obtener ($y_{Hampel-d}$ -x) ⑦ y ($y_{Hampel-i}$ -x) ⑧. Los ajustes y el filtro de hampel se realizan en Matlab, con el código de la Fig.6. Los gráficos de $y_{Hampel-d}$ -x; $y_{Hampel-c}$ -x; $y_{Hampel-i}$ -x se presentan en ⑨, se establece la alineación horizontal en Civil 3D con secciones de líneas rectas, y curvas circulares en ⑩ y ⑪, con progresiva de inicio en el Km 17+000 hasta el Km 27+000.

```

% 01. AJUSTE POR SUAVIZADO DE SPLINE
% Extraer coordenadas Este y Norte de nube de puntos de señalización vial
DatosTXT = readmatrix('Nube de puntos de señalización vial Central.txt');
% cambiar el nombre segun corresponda (Izquierdo, Derecho)
Este = DatosTXT(:, 1);
Norte = DatosTXT(:, 2);

% Ordenar en base a los datos de la coordenada Este
Datos_Ordenados = sortrows(DatosTXT, 1);

% Eliminar los datos duplicados de las coordenadas Norte
[Unico_Este, Unico_Indices] = unique(Datos_Ordenados(:, 1));
Unico_Norte = Datos_Ordenados(Unico_Indices, 2);

% Determinar el valor mínimo y máximo de la coordenada Este
xmin = min(Unico_Este);
xmax = max(Unico_Este);

% Determinar las coordenadas Este con un incremento de 1 metro
x_1m = (xmin:1:xmax)';

% Ajuste por suavizado de Spline para alineación horizontal
[Ajuste_norte, gof_norte] = fit(Unico_Este, Unico_Norte, ...
    'smoothingspline', 'SmoothingParam', 0.9);
yfit_x = feval(Ajuste_norte, x_1m);

% Guardar las coordenadas por metro en archivo txt con 4 decimales
Archivo = 'Suavizado de Spline-Central por metro.txt';
% cambiar el nombre segun corresponda (Izquierdo, Derecho)
Datos = [x_1m, yfit_x];

% Abrir el archivo para escritura
fid = fopen(Archivo, 'w');

% Escribir los datos con 4 decimales
fprintf(fid, '%.4f,%.4f,%.4f\n', Datos. ');

% Cerrar el archivo
fclose(fid);

% 02. FILTRO DE HAMPEL
n = 150; % Tamaño de la ventana para calcular la mediana y MAD
Filas = length(x_1m);
yhampel_x = zeros(Filas, 2);

for i = 1:Filas
    % Obtener los índices de los datos vecinos
    if i <= n
        indices_vecinos = 1:i+n;
    elseif i >= Filas - n
        indices_vecinos = i-n:Filas;
    else
        indices_vecinos = i-n:i+n;
    end

    % Calcular la mediana y la desviación mediana absoluta
    mediana = median(x_1m(indices_vecinos));
    MAD = median(abs(x_1m(indices_vecinos) - mediana));

    % Calcular el Parámetro de ajuste
    t = 3 * 1.4826 * MAD;

    % Aplicar filtro de Hampel para detectar atípicos
    if abs(x_1m(i) - mediana) > t
        yhampel_x(i, :) = NaN; % Marcar los atípicos como NaN
    else
        yhampel_x(i, :) = [x_1m(i), yfit_x(i)];
    end
end

% Eliminar filas con valores atípicos (NaN)
yhampel_x = yhampel_x(~any(isnan(yhampel_x), 2), :);

% Guardar los datos filtrados en un nuevo archivo txt:
Archivo_Filtrado = 'Filtro de Hampel a Spline-Central.txt';
% cambiar el nombre segun corresponda (Izquierdo, Derecho)
writematrix(yhampel_x, Archivo_Filtrado);

```

Fig. 6. Código Matlab para el ajuste por suavizado de spline y filtro de hampel para la alineación horizontal.

C. Ajuste de alineación vertical

El flujo del procedimiento para el ajuste de la alineación vertical se presenta en la Fig. 7.

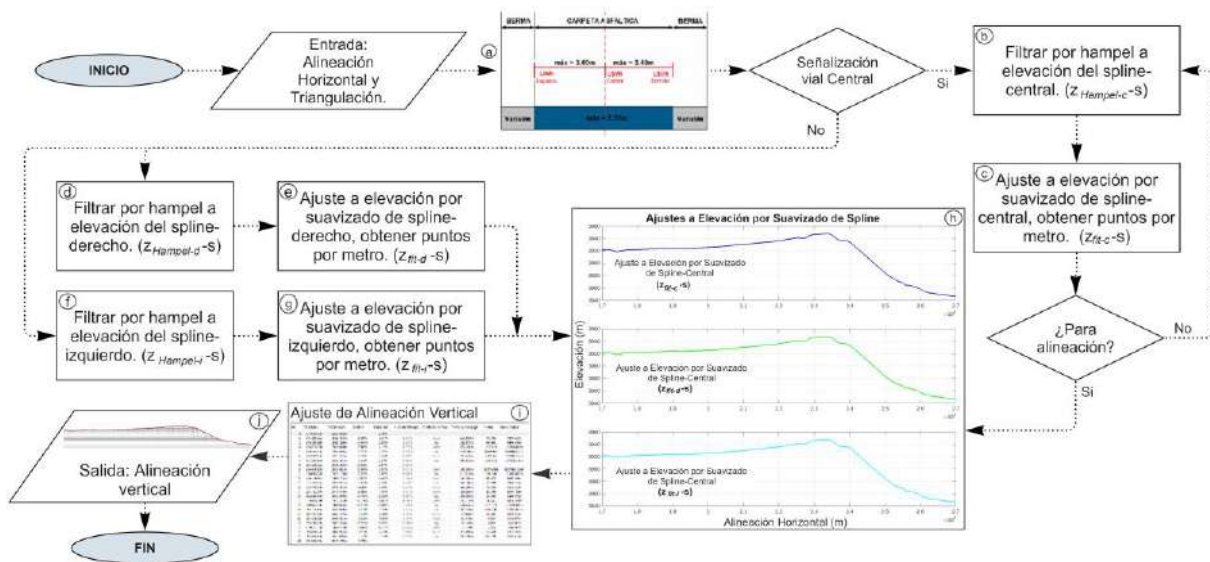


Fig. 7. Flujo de trabajo del ajuste de alineación vertical.

Extraer las elevaciones a lo largo de la alineación horizontal y la señalización vial derecho e izquierdo del modelo de triangulación a cada 1 metro de distancia (s) (a). se aplica el filtro de Hampel para eliminar los valores atípicos y picos, obteniendo $Z_{Hampel-c-s}$ (b). Luego se emplea el ajuste por suavizado de spline para obtener $Z_{fit-c-s}$ (c), de ser necesario se repite el filtro de hampel y su ajuste hasta que los datos sean adecuados para la alineación vertical.

Para las elevaciones del spline-derecho e izquierdo se aplica el filtro de Hampel, obteniendo $(Z_{Hampel-d} -s)$ ④ y $(Z_{Hampel-i} -s)$ ⑤ respectivamente, luego se ajustan las elevaciones por suavizado de spline para obtener $(Z_{fit-d} -s)$ ⑥ y $(Z_{fit-i} -s)$ ⑦. estos se realizan en Matlab, con el código de la Fig.8.

```

% 01. FILTRO DE HAMPEL
% Extraer las progresivas a 5 metros y sus Elevaciones
DatosTXT = readmatrix('Elevación de Spline-Central.txt');
% cambiar el nombre segun corresponda (Izquierdo, Derecho)
s_1m = DatosTXT(:, 1);
z_s = DatosTXT(:, 2);

n = 150; % Tamaño de la ventana para calcular la mediana y MAD
Filas = length(s_1m);
zhampel_s = zeros(Filas, 2);

for i = 1:Filas
% Obtener los índices de los datos vecinos
if i <= n
    indices_vecinos = 1:i+n;
elseif i >= Filas - n
    indices_vecinos = i-n:Filas;
else
    indices_vecinos = i-n:i+n;
end

% Calcular la mediana y la desviación mediana absoluta
mediana = median(s_1m(indices_vecinos));
MAD = median(abs(s_1m(indices_vecinos) - mediana));
% Calcular el Parámetro de ajuste
t = 3 * 1.4826 * MAD;
% Aplicar filtro de Hampel para detectar valores atipicos
if abs(s_1m(i) - mediana) > t
    zhampel_s(i, :) = NaN; % Marcar atipicos como NaN
else
    zhampel_s(i, :) = [s_1m(i), z_s(i)];
end
end

% Eliminar filas con valores atipicos (NaN)
zhampel_s = zhampel_s(~any(isnan(zhampel_s), 2), :);

% Guardar los datos filtrados en un nuevo archivo txt:
File_Filtrado='Filtro de Hampel a Elev. de Spline-Central.txt';
% cambiar el nombre segun corresponda (Izquierdo, Derecho)
writematrix(zhampel_s, File_Filtrado);

% 02. AJUSTE POR SUAVISADO DE SPLINE
% Determinar el valor mín. y máx. de las progresivas de la Alineación
Horizontal
xmin = min(zhampel_s(:, 1));
xmax = max(zhampel_s(:, 1));

% Determinar las progresivas de la alineación Horizontal con incremento de 1m
s_1m = (xmin:1:xmax)';

% Ajuste por suavizado de Spline para alineación vertical
[Ajuste_elevacion, gof_elevacion] = fit(zhampel_s(:, 1), zhampel_s(:, 2), ...
'smoothingspline', 'SmoothingParam', 0.9);
zfit_s = feval(Ajuste_elevacion, s_1m);

% Guardar las elevaciones por metro en un archivo txt con 4 decimales
Archivo = 'Ajuste a Elevación de Spline-Central.txt';
% cambiar el nombre segun corresponda (Izquierdo, Derecho)
Datos = [s_1m, zfit_s];

% Abrir el archivo para escritura
fid = fopen(Archivo, 'w');

% Escribir los datos con 4 decimales
fprintf(fid, '%.4f,%.4f\n', Datos. ');

% Cerrar el archivo
fclose(fid);

% Grafico del ajuste a elevación por suavizado de spline
figure('Name', 'Ajuste a Elevación por Suavizado de Spline');
plot(s_1m, zfit_s, 'b', 'LineWidth', 1.5);
xlabel('Alineación Horizontal (m)');
ylabel('Elevación');
title('Ajuste a Elevación por Suavizado de Spline-Central');
% cambiar el titulo segun corresponda (Izquierdo, Derecho)
legend('z_{fit-c} -s');
grid on;

```

Fig. 8. Código Matlab para el ajuste por suavizado de spline y filtro de hampel para la alineación vertical

Se presentan los gráficos de $Z_{fit-d} -s$; $Z_{fit-c} -s$; $Z_{fit-i} -s$ en ⑧, y se establece la alineación vertical en Civil 3D con secciones de líneas rectas y parábolas en ⑨ y ⑩.

D. Procesamiento de secciones transversales

El procedimiento descrito en la Fig. 9 permite determinar con precisión los componentes primarios de la carretera, a pesar de los límites ambiguos y los cambios que haya tenido.

Paso 1, determinar las LSVH (Líneas de Señalización Vial Horizontal). El procedimiento completo se detalla en el ajuste de alineación horizontal, se extraen las nubes de puntos de las marcas viales, Luego, son ajustadas mediante suavizado de spline y filtradas por hampel para eliminar datos atípicos, obteniendo así las LSVH-1 (derecho), LSVH-2 (central) y LSVH-3 (izquierdo).

Paso 2, determinar las LBCH (Líneas de Borde de Carril Horizontal). en la norma 8.2-IC Marcas viales de la instrucción de carreteras de España [33], se desplaza las marcas viales exteriores hacia los bordes de la calzada de 0.10 a 0.15 metros, en ese caso la polilínea de LSVH se desplaza. En cambio, la norma aplicable al caso de estudio el Manual de dispositivos de control del tránsito automotor para calles

y carreteras de Perú [34], menciona que las marcas viales del pavimento indican la separación de carriles, en ese caso la polilínea de las LSVH se transforma en LBCH.

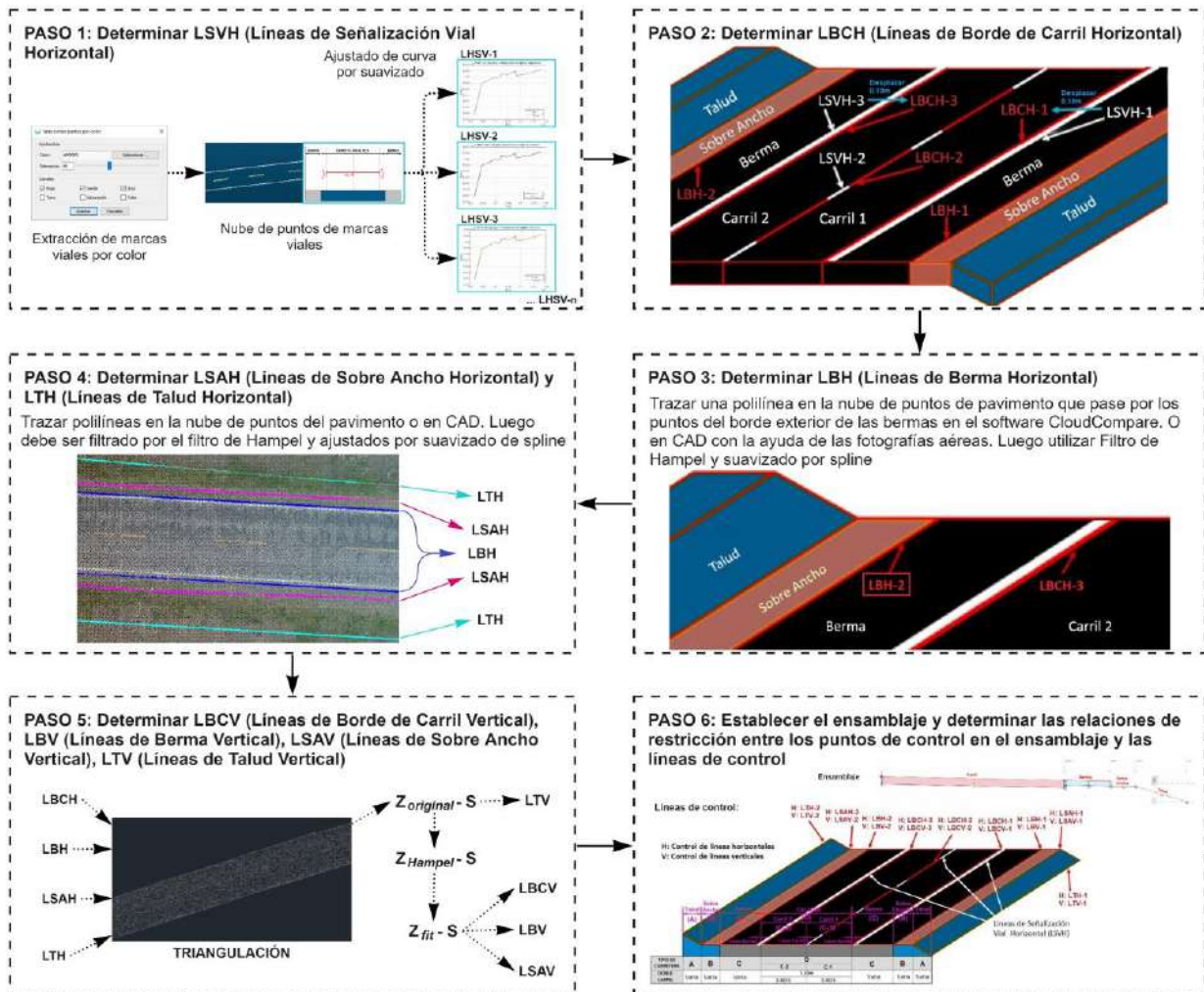


Fig. 9. Flujo de trabajo del procesamiento de secciones transversales.

Paso 3, determinar las LBH (Líneas de Borde Horizontal). se traza una polilínea por el borde exterior de las bermas en la nube de puntos de pavimento en el software CloudCompare, o escalar las fotografías aéreas en CAD y delinear el borde exterior de la berma. Posteriormente, las LBH se filtran por Hampel y ajustan por suavizado de spline, con el código Matlab de la Fig. 6.

Paso 4, determinar LSAH (Líneas de Sobre Ancho Horizontal) y LTH (Líneas de Talud Horizontal). Se trazan polilíneas en los bordes del sobre ancho y los pies del talud en la nube de puntos del pavimento, estas líneas deben ser filtrados por Hampel y ajustadas por suavizado de spline, con el código Matlab de la Fig. 6.

Paso 5, determinar LBCV (Líneas de borde de Carril Vertical), LBV (Líneas de Berma Verticales), LSAV (Líneas de Sobre Ancho Vertical), LTV (Líneas de Talud vertical). Todas las líneas de control horizontales (LBCH, LBH, LSAH y LTH) son alineaciones independientes con sus propias estaciones.

Se extraen las elevaciones ($z_{original}$ -s) del modelo de triangulación a lo largo de las LBCH, LBH, LSAH y LTH a cada estación s , las cuales se filtran por Hampel (z_{Hampel} -s) y ajustan por suavizado de spline (z_{fit} -s) con el código Matlab de la Fig. 8. Pero las LBCV se determinaron en el ajuste de alineación vertical. y las elevaciones $z_{original}$ -s de LTH son utilizados directamente, para no alterar las elevaciones del pie de talud y coincidan con el modelo de triangulación. Las líneas resultantes se denominan LBCV, LBV, LSAV y LTV, respectivamente.

Paso 6, establecer el ensamblaje de la sección transversal de la carretera, Este ensamblaje es un modelo 2D que representa los componentes de la sección transversal mediante puntos de control variables que se vinculan a las líneas de control horizontales (determinan los anchos de los componentes) y las líneas de control verticales (determinan el bombeo, peralte y las pendientes de los taludes). El bombeo no debe exceder el 2.5% y la pendiente del talud no es menor a 1:3 según el Manual de Carreteras (DG 2018) [33].

La Fig. 10 muestra las líneas de control y el ensamblaje, y la Tabla II presenta las restricciones de desplazamiento y elevación asociadas. El espesor del pavimento se puede configurar adecuadamente de acuerdo con las normas de diseño, aunque no es el enfoque principal de esta investigación.

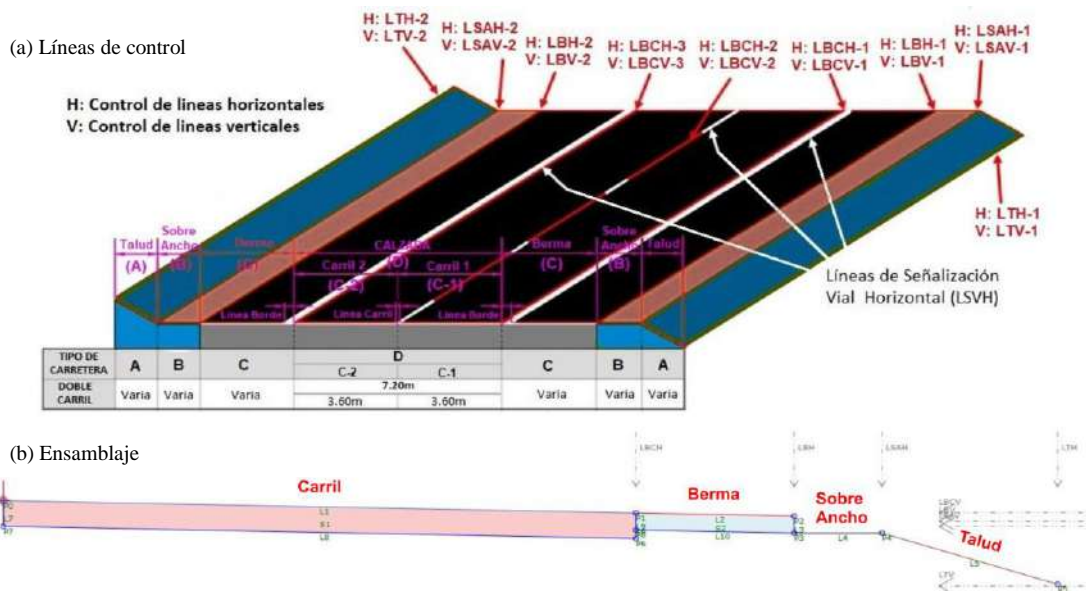


Fig. 10. El ensamblaje de la carretera y sus líneas de control correspondientes.

TABLA II
PUNTOS DE CONTROL EN EL ENSAMBLAJE Y SUS LÍNEAS DE CONTROL CORRESPONDIENTES.

Punto	Restricción de desplazamiento	Restricción de elevación	Línea	Componente
P0 (origen)	Alineación horizontal	Alineación vertical	L1	-
P1	LBCH	LBCV	L2	Carril
P2	LBH	LBV	-	Berma
P3	LBH	LSAV	L4	-
P4	LSAH	LSAV	L5	Sobre ancho
P5	LTH	LTV	-	Talud

E. Hermanamiento digital

se crear el GD de la carretera en Civil 3D. Las LBCH, LBCV, LBH, LBV, LSAH, LSAV, LTH y LTV se conectan a los puntos de control del ensamblaje, según a la Tabla II. El terreno cubierto por la carretera no es esencial para el proceso de hermanamiento digital.

F. Evaluación de la condición de la carretera

La evaluación se basa en el Manual de Mantenimiento o Conservación Vial [35], que busca identificar y definir la gravedad del deterioro. El ahuellamiento se detecta en los cortes transversales del modelo de triangulación de cada 10m, los baches y deformaciones estructurales con las secciones longitudinales de cada 0.50m, y el resto se detecta con la ortofoto. El nivel de gravedad se define según la Tabla III.

TABLA III
CLASIFICACIÓN DE DETERIOROS O FALLAS DE LA CONDICIÓN DE LA CARRETERA

Clasificación	Código	Deterioro o Fallas	Nivel de Gravedad	Medida A _{ij} =Área N _{ij} =Número L _{ij} =Longitud	Extensión de Falla EF	Extensión Promedio ponderada EFp	Puntaje de condición		
							Leve EFp <10%	Moderado EFp ≥10% y ≤ 30%	Severo EFp >30%
Deterioro o Falla Estructural	1	Piel de cocodrilo	1: Malla grande > 0.5m	A ₁₁	EF ₁₁ = (A ₁₁ /As)*100	EFp=(EF ₁₁ *A ₁₁ +EF ₁₂ *A ₁₂ +EF ₁₃ *A ₁₃)/(A ₁₁ +A ₁₂ +A ₁₃)	> 0 y < 40	≥ 40 y < 200	200
			2: Malla mediana 0.3 hasta 0.5m	A ₁₂	EF ₁₂ = (A ₁₂ /As)*100				
			3: Malla pequeña < 0.3m	A ₁₃	EF ₁₃ = (A ₁₃ /As)*100				
	2	Fisuras longitudinales	1: Fisuras de ancho ≤ 1mm	A ₂₁	EF ₂₁ = (A ₂₁ /As)*100	EFp=(EF ₂₁ *A ₂₁ +EF ₂₂ *A ₂₂ +EF ₂₃ *A ₂₃)/(A ₂₁ +A ₂₂ +A ₂₃)	> 0 y < 20	≥ 20 y < 100	100
			2: Fisuras de ancho > 1mm y ≤ 3mm	A ₂₂	EF ₂₂ = (A ₂₂ /As)*100				
			3: Fisuras de ancho > 3mm, grieta.	A ₂₃	EF ₂₃ = (A ₂₃ /As)*100				
	3	Deformación por deficiencia estructural	1: Profundidad < 2cm	A ₃₁	EF ₃₁ = (A ₃₁ /As)*100	EFp=(EF ₃₁ *A ₃₁ +EF ₃₂ *A ₃₂ +EF ₃₃ *A ₃₃)/(A ₃₁ +A ₃₂ +A ₃₃)	> 0 y < 20	≥ 20 y < 100	100
			2: Profundidad 2cm hasta 4cm	A ₃₂	EF ₃₂ = (A ₃₂ /As)*100				
			3: Profundidad > 4cm	A ₃₃	EF ₃₃ = (A ₃₃ /As)*100				
	4	Ahuellamiento	1: Profundidad ≤ 6mm	A ₄₁	EF ₄₁ = (A ₄₁ /As)*100	EFp=(EF ₄₁ *A ₄₁ +EF ₄₂ *A ₄₂ +EF ₄₃ *A ₄₃)/(A ₄₁ +A ₄₂ +A ₄₃)	> 0 y < 20	≥ 20 y < 100	100
			2: Profundidad > 6mm y ≤ 12mm	A ₄₂	EF ₄₂ = (A ₄₂ /As)*100				
3: Profundidad > 12mm			A ₄₃	EF ₄₃ = (A ₄₃ /As)*100					
5	Reparaciones o Parchados	1: Reparación superficiales.	A ₅₁	EF ₅₁ = (A ₅₁ /As)*100	EFp=(EF ₅₁ *A ₅₁ +EF ₅₂ *A ₅₂ +EF ₅₃ *A ₅₃)/(A ₅₁ +A ₅₂ +A ₅₃)	> 0 y < 10	≥ 10 y < 50	50	
		2: Reparaciones en buen estado.	A ₅₂	EF ₅₂ = (A ₅₂ /As)*100					
		3: Reparaciones en mal estado.	A ₅₃	EF ₅₃ = (A ₅₃ /As)*100					
6	Peladuras y desprendimientos	1: Puntual sin base granular (peladura superficial)	A ₆₁	EF ₆₁ = (A ₆₁ /As)*100	EFp=(EF ₆₁ *A ₆₁ +EF ₆₂ *A ₆₂ +EF ₆₃ *A ₆₃)/(A ₆₁ +A ₆₂ +A ₆₃)	> 0 y < 10	≥ 10 y < 50	50	
		2: puntual con base granular.	A ₆₂	EF ₆₂ = (A ₆₂ /As)*100					
		3: Continuo con base granular.	A ₆₃	EF ₆₃ = (A ₆₃ /As)*100					
7	Baches (huecos)	1: Diámetro < 0.2m	N ₇₁	-	EFp= N ₇₁ +N ₇₂ +N ₇₃	> 0 y < 20	≥ 20 y < 100	100	
		2: Diámetro entre 0.2 y 0.5m	N ₇₂	-					
		3: Diámetro > 0.5 m	N ₇₃	-					
Deterioro o Falla Superficial	8	Fisuras transversales	1: Fisuras de ancho ≤ 1mm	A ₈₁	EF ₈₁ = (A ₈₁ /As)*100	EFp=(EF ₈₁ *A ₈₁ +EF ₈₂ *A ₈₂ +EF ₈₃ *A ₈₃)/(A ₈₁ +A ₈₂ +A ₈₃)	> 0 y < 10	≥ 10 y < 50	50
			2: Fisuras de ancho > 1mm y ≤ 3mm	A ₈₂	EF ₈₂ = (A ₈₂ /As)*100				
			3: Fisuras de ancho > 3 mm, grieta.	A ₈₃	EF ₈₃ = (A ₈₃ /As)*100				
9	9	Exudación	En función al área afectada	A _{9,1-3}	EF _{9,1-3} = (A _{9,1-3} /As)*100	EFp=(EF ₉₁ *A ₉₁ +EF ₉₂ *A ₉₂ +EF ₉₃ *A ₉₃)/(A ₉₁ +A ₉₂ +A ₉₃)	> 0 y < 20	≥ 20 y < 100	100
Berma Pavimentada	10	Daños puntuales	1: Daños puntuales baches o erosión	A ₁₀₁	EF ₁₀₁ = (A ₁₀₁ /As)*100	EFp=(EF ₁₀₁ *A ₁₀₁ +EF ₁₀₂ *A ₁₀₂ +EF ₁₀₃ *A ₁₀₃)/(A ₁₀₁ +A ₁₀₂ +A ₁₀₃)	> 0 y < 10	≥ 10 y < 50	50
			2: Daños < 30% de la berma	A ₁₀₂	EF ₁₀₂ = (A ₁₀₂ /As)*100				
			3: Deterioros > 30% de la berma	A ₁₀₃	EF ₁₀₃ = (A ₁₀₃ /As)*100				
11	Desnivel calzada - berma	1: Desenivel leve < 15mm	L ₁₁₁	EF ₁₁₁ = (A ₁₁₁ /As)*100	EFp=(EF ₁₁₁ *L ₁₁₁ +EF ₁₁₂ *L ₁₁₂ +EF ₁₁₃ *L ₁₁₃)/(L ₁₁₁ +L ₁₁₂ +L ₁₁₃)	> 0 y < 20	≥ 20 y < 100	100	
		2: Desenivel moderado entre 15 y 50mm	L ₁₁₂	EF ₁₁₂ = (A ₁₁₂ /As)*100					
		3: Desenivel severo > 50mm	L ₁₁₃	EF ₁₁₃ = (A ₁₁₃ /As)*100					

As: Área de sección evaluada = Ancho de calzada x Longitud de evaluación (200m)

IV. RESULTADOS

A. Procesamiento de datos

Se recopilaron datos mediante fotogrametría en un área de 0.988 km², a 56.2 m de altitud de vuelo, obteniendo 2424 imágenes con resolución de 1.35 cm/píxel. El procesamiento generó 1621634 puntos con un error de reproyección de 1.02 píxeles. Los puntos de control mostraron errores de 0.66cm en x, 0.77cm en y, y 0.42cm en z, asegurando alta precisión en el levantamiento topográfico permitiendo identificar con precisión los componentes de la carretera.

B. Alineación horizontal.

En base al ajuste de alineación horizontal, los resultados del ajuste de alineación horizontal se muestran en la Fig. 11. En (b) son los resultados del ajuste por suavizado de spline central (y_{fit-c} -x), y (c) su posterior filtro de hampel ($y_{Hampel-c}$ -x), que es adecuado para establecer la alineación horizontal. También se presenta en (e) y (g) los resultados del ajuste por suavizado de spline derecho (y_{fit-d} -x) e izquierdo (y_{fit-i} -x), y sus respectivos filtros de hampel ($y_{Hampel-d}$ -x) y ($y_{Hampel-i}$ -x) en (f) y (h).

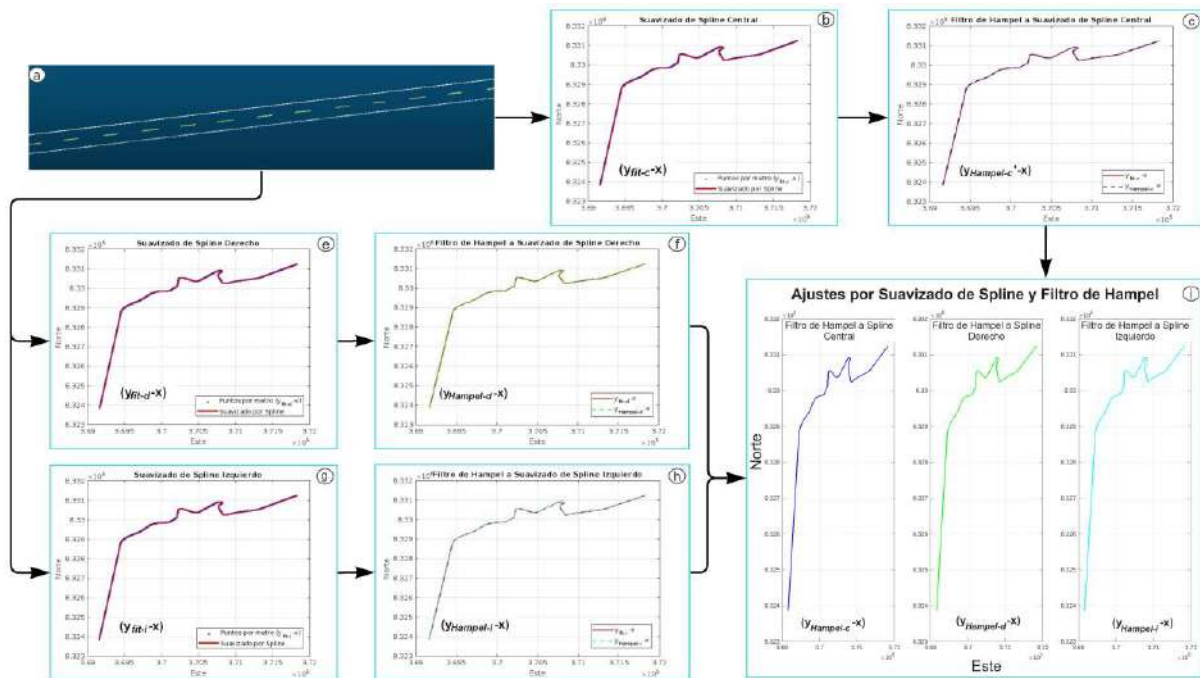


Fig. 11. Resultado del ajuste de alineación horizontal.

La Tabla IV detalla los parámetros de ajuste y evaluación de la alineación horizontal de los pasos de la Fig. 11. Mientras que en la Tabla V se describe la información de la alineación horizontal final, donde se detalla el tipo de elemento en la alineación, su ubicación, longitudes, radios y los ángulos delta en las curvas.

TABLA IV
PARÁMETROS DE AJUSTE Y EVALUACIÓN DE LA ALINEACIÓN HORIZONTAL.

Nombre	Imagen	Método	RMSE	R ²	n	t
Suavizado de spline central $y_{fit-c} -x$	(b)	Ajuste por suavizado de spline	0.37	1	-	-
Filtro de hampel spline central $y_{Hampel-c} -x$	(c)	Filtro de Hampel	-	-	150	169.02
Suavizado de spline derecho $y_{fit-d} -x$	(e)	Ajuste por suavizado de spline	0.36	1	-	-
Filtro de hampel spline derecho $y_{Hampel-d} -x$	(f)	Filtro de Hampel	-	-	150	169.02
Suavizado de spline izquierdo $y_{fit-i} -x$	(g)	Ajuste por suavizado de spline	0.46	1	-	-
Filtro de hampel spline izquierdo $y_{Hampel-i} -x$	(h)	Filtro de Hampel	-	-	150	169.02

RMSE (Error Cuadrático Medio): mide la precisión o el error, cuanto más cercano a 0 mayor precisión.

R2 (coeficiente de determinación): indica la calidad del ajuste, cuanto más cerca esté de 1 mayor calidad.

n y t: son parámetros empleados en el filtrado de Hampel, que se introdujeron en la sección III.B

TABLA V
INFORMACIÓN DE LA ALINEACIÓN HORIZONTAL.

Nº	Tipo	Estación Inicial	Estación Final	Punto de Inicio (x, y)	Punto Final (x, y)	Long. (m)	Radio (m)	Dirección	Áng. delta
1	Línea 1	17+000.00	21+861.53	369166.22 8323908.38	369448.90 8328761.68	4861.53	-	N3° 20' 01"E	
2	Curva 1	21+861.53	22+341.46	369448.90 8328761.68	369598.94 8329211.72	479.93	910.26		33.57
3	Línea 2	22+341.46	22+512.04	369598.938 8329211.72	369693.189 8329353.89	170.57	-	N33° 32' 32"E	
4	Curva 2	22+512.04	22+608.88	369693.19 8329353.89	369737.953 8329439.57	96.85	465.71		13.24
5	Línea 3	22+608.88	22+909.93	369737.95 8329439.57	369848.91 8329719.43	301.05	-	N21° 37' 39"E	
6	Curva 3	22+909.93	23+006.13	369848.91 8329719.43	369905.66 8329795.75	96.20	183.64		33.35
7	Línea 4	23+006.13	23+069.08	369905.66 8329795.75	369955.022 8329834.81	62.95	-	N51° 38' 30"E	
8	Curva 4	23+069.08	23+122.52	369955.02 8329834.81	370004.45 8329852.51	53.44	82.03		41.47
9	Línea 5	23+122.52	23+169.41	370004.45 8329852.51	370051.33 8329853.35	46.89	-	N88° 57' 57"E	
10	Curva 5	23+169.41	23+255.72	370051.33 8329853.35	370119.34 8329898.67	86.32	75.75		72.54
11	Línea 6	23+255.72	23+448.26	370119.34 8329898.67	370196.66 8330074.99	192.54	-	N23° 40' 45"E	
12	Curva 6	23+448.26	23+523.13	370196.660 8330074.99	370213.613 8330147.49	74.87	203.95		23.37
13	Línea 7	23+523.13	23+884.78	370213.61 8330147.49	370230.31 8330508.75	361.65	-	N2° 38' 46"E	
14	Curva 7	23+884.78	23+986.75	370230.31 8330508.75	370305.27 8330532.95	101.97	42.06		154.36
15	Línea 8	23+986.75	24+177.42	370305.27 8330532.95	370423.78 8330383.59	190.67	-	N38° 25' 53"E	
16	Curva 8	24+177.42	24+278.17	370423.781 8330383.59	370507.905 8330392.53	100.75	50.08		128.07
17	Línea 9	24+278.17	24+834.21	370507.905 8330392.53	370754.293 8330891.00	556.04	-	N26° 18' 10"E	
18	Curva 9	24+834.21	24+951.43	370754.29 8330891.00	370823.03 8330859.08	117.23	37.90		196.90
19	Línea 10	24+951.43	25+015.59	370823.02 8330859.08	370797.43 8330800.25	64.16	-	N23° 30' 45"E	
20	Curva 10	25+015.59	25+224.20	370797.43 8330800.25	370772.70 8330596.05	208.60	359.84		36.91
21	Línea 11	25+224.20	25+553.92	370772.70 8330596.05	370828.27 8330271.04	329.72	-	N9° 42' 11"E	
22	Curva 11	25+553.92	25+618.78	370828.27 8330271.04	370878.57 8330253.43	64.87	30.47		135.54
23	Línea 12	25+618.78	25+680.89	370878.57	370924.94	62.11	-	N48° 18' 27"E	

				8330253.43	8330294.74				
24	Curva 12	25+680.89	25+827.07	370924.943	371044.025	146.18	652.91		14.25
				8330294.74	8330378.98				
25	Línea 13	25+827.07	26+093.96	371044.025	371277.763	266.90	-	N61° 08' 06"E	
				8330378.98	8330507.83				
26	Curva 13	26+093.96	26+183.16	371277.763	371343.914	89.20	200.64		28.30
				8330507.83	8330566.56				
27	Línea 14	26+183.16	27+000.04	371343.914	371820.169	816.88	-	N35° 39' 47"E	
				8330566.56	8331230.24				

C. Alineación vertical.

En base al ajuste de alineación vertical, los resultados del ajuste de alineación vertical se muestran en la Fig. 12. En (b) son el resultado del filtro por hampel de las elevaciones extraídas del modelo de triangulación de la alineación horizontal ($Z_{Hampel-c}$ -s) y su ajuste por suavizado de spline (Z_{fit-c} -s) en (c) que es adecuado para establecer la alineación vertical. También se presenta en (d) y (f) el filtro de hampel de las elevaciones del spline-derecho e izquierdo ($Z_{Hampel-d}$ -s y $Z_{Hampel-i}$ -s), y sus respectivos sus ajustes (Z_{fit-d} -s; Z_{fit-i} -s) en (e) y (g).

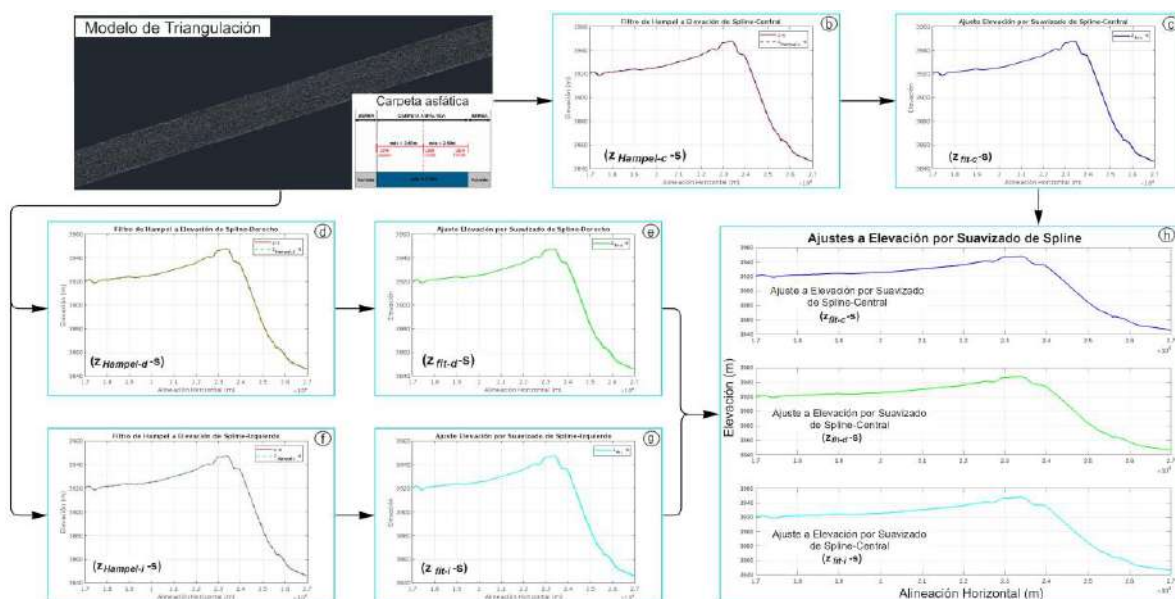


Fig. 12. Resultado del ajuste de alineación vertical.

La Tabla VI detalla los parámetros de ajuste y evaluación de la alineación vertical de cada paso de la Fig. 12.

TABLA VI
PARÁMETROS DE AJUSTE Y EVALUACIÓN DE LA ALINEACIÓN VERTICAL.

Nombre	Imagen	Método	RMSE	R ²	n	t
Filtro de hampel spline central $Z_{Hampel-c}$ -s	(b)	Filtro de Hampel	-	-	150	169.02
Suavizado de spline central Z_{fit-c} -s	(c)	Ajuste por suavizado de spline	0.01	1	-	-
Filtro de hampel spline derecho $Z_{Hampel-d}$ -s	(d)	Filtro de Hampel	-	-	150	169.02
Suavizado de spline derecho Z_{fit-d} -s	(e)	Ajuste por suavizado de spline	0.01	1	-	-
Filtro de hampel spline izquierdo $Z_{Hampel-i}$ -s	(f)	Filtro de Hampel	-	-	150	169.02
Suavizado de spline izquierdo Z_{fit-i} -s	(g)	Ajuste por suavizado de spline	0.01	1	-	-

RMSE (Error Cuadrático Medio): mide la precisión o el error, cuanto más cercano a 0 mayor precisión.

R² (coeficiente de determinación): indica la calidad del ajuste, cuanto más cerca esté de 1 mayor calidad.

n y t: son parámetros empleados en el filtrado de Hampel, que se introdujeron en la sección III.B.

La información de la alineación vertical final se describe en la Tabla VII. Donde se presentan los PIV (Punto de Intersección Vertical) que indica el punto en el cual cambia la pendiente vertical, sus respectivas elevaciones, pendientes de entrada y salida (pendientes antes y después del PIV), Las longitudes curvas vertical, sus valores K y radios.

TABLA VII
INFORMACIÓN DE LA ALINEACIÓN VERTICAL.

N°	Estación PIV	Elevación PIV (m)	Pend. de entrada	Pend. de salida	Tipo curva de perfil	Tipo de subentidad	Long. curva vertical (m)	Valor k	Radio de curva (m)
1	17+000.00	3920.96		1.00%					
2	17+178.35	3922.74	1.00%	-1.90%	Convexa	Parábola	224.96	77.64	7764.35
3	17+399.80	3918.53	-1.90%	0.99%	Cóncava	Parábola	134.33	46.44	4644.22
4	17+701.50	3921.51	0.99%	0.17%	Convexa	Parábola	277.65	339.43	33942.75
5	18+386.58	3922.70	0.17%	0.29%	Cóncava	Parábola	214.74	1877.14	187713.88
6	18+990.29	3924.43	0.29%	-0.37%	Convexa	Parábola	194.85	295.14	29513.47
7	19+253.19	3923.45	-0.37%	0.29%	Cóncava	Parábola	129.79	195.05	19504.46
8	20+280.34	3926.45	0.29%	0.54%	Cóncava	Parábola	24.82	100.00	10000
9	21+144.94	3931.12	0.54%	0.54%	Cóncava	Parábola	1099.53	284583.71	28458370.75
10	21+938.89	3935.44	0.54%	1.00%	Cóncava	Parábola	227.48	500.00	50000
11	22+529.62	3941.34	1.00%	-0.70%	Convexa	Parábola	150.00	88.35	8835.13
12	22+735.75	3939.90	-0.70%	3.39%	Cóncava	Parábola	130.26	31.88	3188.21
13	22+919.99	3946.14	3.39%	0.37%	Convexa	Parábola	102.87	34.10	3410.22
14	23+457.63	3948.13	0.37%	-5.23%	Convexa	Parábola	203.64	36.34	3633.53
15	23+669.22	3937.06	-5.23%	-0.30%	Cóncava	Parábola	175.26	35.51	3551.38
16	23+959.19	3936.19	-0.30%	-4.92%	Convexa	Parábola	184.00	39.82	3981.58
17	24+405.67	3914.22	-4.92%	-5.12%	Convexa	Parábola	98.78	500.00	50000
18	24+983.99	3884.63	-5.12%	-4.00%	Cóncava	Parábola	154.27	138.63	13863.27
19	25+278.02	3872.85	-4.00%	-2.08%	Cóncava	Parábola	96.24	50.00	5000
20	25+458.90	3869.09	-2.08%	-3.38%	Convexa	Parábola	64.99	50.00	5000
21	25+565.39	3865.49	-3.38%	-8.86%	Convexa	Parábola	16.21	2.96	295.53
22	25+587.66	3863.52	-8.86%	5.47%	Cóncava	Parábola	24.63	1.72	171.89
23	25+610.08	3864.74	5.47%	-1.08%	Convexa	Parábola	11.56	1.77	176.57
24	25+662.91	3864.17	-1.08%	-0.54%	Cóncava	Parábola	43.40	80.00	8000
25	25+713.29	3863.90	-0.54%	-1.58%	Convexa	Parábola	41.84	40.00	4000
26	25+868.38	3861.44	-1.58%	-2.89%	Convexa	Parábola	70.89	54.40	5440.18
27	26+177.25	3852.52	-2.89%	-0.73%	Cóncava	Parábola	291.11	135.08	13507.48
28	27+000.00	3846.48	-0.73%						

D. Sección transversal, hermanamiento digital.

En base al procesamiento de secciones transversales, se obtienen los parámetros utilizados en el filtro, la evaluación del ajuste y las restricciones se detallan en la Tabla VIII. Los resultados del ajuste para las LBH, LBV, LSAH, LSAV, LTH y LTV derecha e izquierda, y su vinculación a los puntos de restricción del Ensamblaje de la carretera se muestra en la Fig. 13.

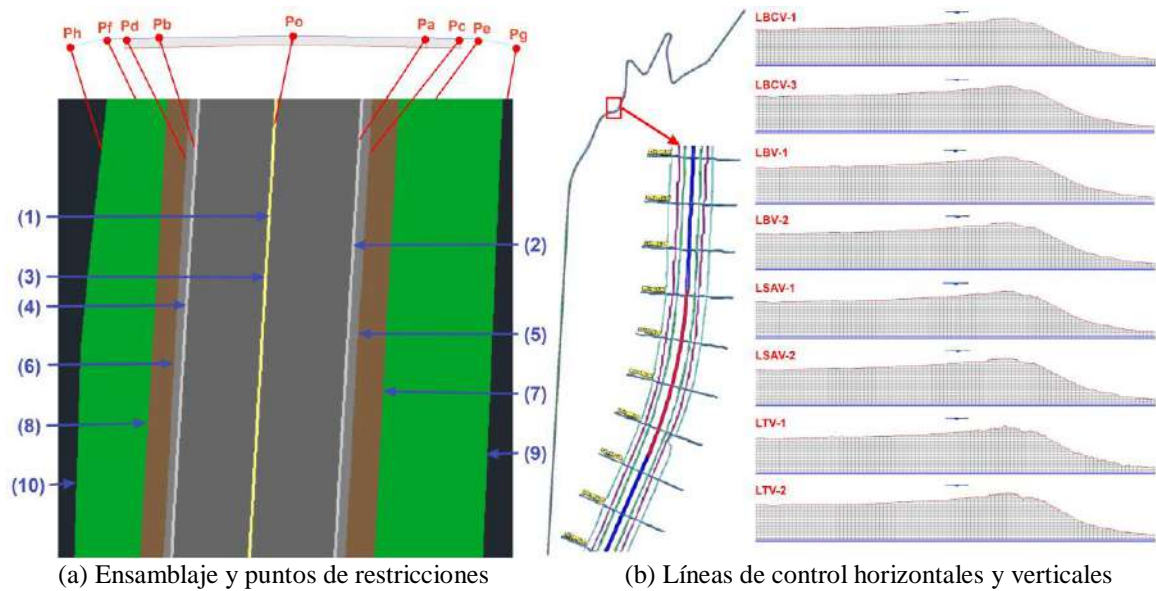


Fig. 13. Ensamblaje de la carretera, restricciones y método de modelado.

PARÁMETROS DE AJUSTE, EVALUACIÓN DE LAS ALINEACIONES Y ASIGNACIÓN DE RESTRICCIONES.

N°	Punto de restricción en Fig. 13		Método	n	t	RMSE	R ²
	Líneas Horizontales	Líneas Verticales					
(1)	Alineación Horizontal	Po	Ajuste de alineación horizontal	150	169.02	0.37	1
	Alineación Vertical	Po	Ajuste de alineación vertical	150	169.02	0.01	1
(2)	LBCH-1	Pa	$y_{Hampel-d} -x$ o LSVH-1	150	169.02	0.36	1
	LBCV-1	Pa	$z_{fit-d} -s$	150	169.02	0.01	1
(3)	LBCH-2	Po	LSVH-2 o Alineación Horizontal	150	169.02	0.37	1
	LBCV-2	Po	$z_{fit-c} -s$ o Alineación Vertical	150	169.02	0.01	1
(4)	LBCH-3	Pb	$y_{Hampel-i} -x$ o LSVH-3	150	169.02	0.46	1
	LBCV-3	Pb	$z_{fit-i} -s$	150	169.02	0.01	1
(5)	LBH-1	Pc	Ajuste por spline y Filtro de Hampel	150	169.02	0.11	1
	LBV-1	Pc	Filtro de Hampel y Ajuste por spline	150	169.02	0.02	1
(6)	LBH-2	Pd	Ajuste por spline y Filtro de Hampel	150	169.02	0.19	1
	LBV-2	Pd	Filtro de Hampel y Ajuste por spline	150	169.02	0.02	1
(7)	LSAH-1	Pe	Ajuste por spline y Filtro de Hampel	150	169.02	1.01	1
	LSAV-1	Pe	Filtro de Hampel y Ajuste por spline	150	169.02	0.05	1
(8)	LSAH-2	Pf	Ajuste por spline y Filtro de Hampel	150	169.02	1.42	1
	LSAV-2	Pf	Filtro de Hampel y Ajuste por spline	150	169.02	0.05	1
(9)	LTH-1	Pg	Ajuste por spline y Filtro de Hampel	-	-	-	-
	LTV-1	Pg	Filtro de Hampel y Ajuste por spline	-	-	-	-
(10)	LTH-2	Ph	Ajuste por spline y Filtro de Hampel	-	-	-	-
	LTV-2	Ph	Filtro de Hampel y Ajuste por spline	-	-	-	-

RMSE (Error Cuadrático Medio): mide la precisión o el error, cuanto más cercano a 0 mayor precisión.

R² (coeficiente de determinación): indica la calidad del ajuste, cuanto más cerca esté de 1 mayor calidad.

n y t son parámetros empleados en el filtrado de Hampel, que se introdujeron en la sección III.B.

La información de las secciones transversales se muestra en la Tabla IX y las variaciones de los componentes se muestran en la Fig. 14.



Fig. 14. Secciones transversales del gemelo digital.

TABLA IX
INFORMACIÓN DE LAS SECCIONES TRANSVERSALES TÍPICAS.

Estación	Pend. Talud	Izquierdo					Derecho				Pend. Talud
		Ancho Talud (m)	Sobre Ancho (m)	Berma (m)	Carril (m)	Carril (m)	Berma (m)	Sobre Ancho (m)	Ancho Talud (m)		
17+000	-3.54%	3.24	2.48	0.83	3.56	3.57	0.59	2.05	4.39	-8.77%	
17+200	-37.00%	3.53	1.69	0.71	3.49	3.37	0.54	2.09	5.86	-23.00%	
17+400	-12.00%	2.97	1.40	0.50	3.44	3.39	0.42	1.34	6.27	-6.60%	
17+600	-8.58%	5.13	1.40	0.35	3.45	3.37	0.38	1.79	4.74	-13.00%	
17+800	-25.00%	5.54	1.33	0.44	3.41	3.50	0.25	1.57	3.95	-29.00%	
18+000	-24.00%	4.37	1.46	0.41	3.49	3.52	0.30	1.49	5.29	-25.00%	
18+200	-23.00%	2.76	1.39	0.39	3.60	3.62	0.90	1.66	5.53	-11.00%	
18+400	-25.00%	2.82	1.38	0.34	3.58	3.49	0.17	1.40	4.62	-35.00%	
18+600	-18.00%	3.24	1.36	0.39	3.48	3.40	0.23	1.46	5.29	-14.00%	
18+800	-25.00%	4.19	1.49	0.35	3.51	3.56	0.27	2.22	6.28	-13.00%	
19+000	-11.00%	3.51	1.16	0.41	3.51	3.45	0.19	1.16	4.51	-25.00%	
19+200	-4.31%	4.24	1.05	0.32	3.39	3.47	0.29	1.65	4.37	-11.00%	
19+400	-49.00%	3.82	1.21	0.36	3.49	3.65	0.23	1.67	4.21	-39.00%	
19+600	-34.00%	4.09	1.09	0.24	3.47	3.52	0.43	1.78	5.79	-36.00%	
19+800	-19.00%	3.87	0.87	0.29	3.45	3.59	0.37	1.33	4.48	-27.00%	
20+000	-24.00%	4.56	0.97	0.15	3.49	3.56	0.41	1.53	5.06	-27.00%	
20+200	-18.00%	2.71	1.02	0.38	3.47	3.62	0.37	1.53	4.78	-21.00%	
20+400	-6.10%	3.49	1.12	0.34	3.49	3.61	0.46	1.78	6.38	-12.00%	
20+600	-4.41%	2.70	0.97	0.26	3.49	3.64	0.51	1.68	5.24	-2.33%	
20+800	-12.00%	4.61	0.87	0.30	3.44	3.62	0.45	1.03	5.90	-11.00%	
21+000	3.15%	2.05	0.83	0.27	3.50	3.61	0.42	1.38	4.78	-11.00%	
21+200	-27.00%	4.07	1.36	0.27	3.54	3.60	0.42	1.38	5.01	-43.00%	
21+400	-19.00%	3.46	0.98	0.20	3.46	3.62	0.53	1.59	5.06	-21.00%	
21+600	-18.00%	4.05	1.54	0.56	3.49	3.46	0.17	1.20	5.24	-26.00%	
21+800	-25.00%	5.26	1.99	0.99	3.91	3.47	0.22	0.04	4.82	-29.00%	
22+000	-9.63%	2.65	0.85	0.09	3.64	3.95	0.33	1.42	3.75	-31.00%	
22+200	-13.00%	2.73	1.56	0.27	3.68	3.72	0.23	1.17	4.40	-22.00%	
22+400	-4.13%	4.98	1.74	0.15	3.52	3.61	0.34	2.52	5.00	-20.00%	
22+600	0.07%	3.21	1.85	0.40	3.97	3.52	0.46	0.95	3.24	-20.00%	
22+800	6.89%	6.58	2.44	0.33	3.51	3.48	0.40	1.04	4.10	-3.96%	
23+000	0.07%	6.46	2.40	0.19	3.50	3.68	0.71	1.64	7.50	-52.00%	
23+200	0.07%	4.79	2.82	0.74	4.01	3.65	0.44	2.56	5.18	0.07%	
23+400	0.07%	5.25	2.12	0.14	3.58	3.61	0.41	2.69	5.33	-43.00%	
23+600	0.07%	6.19	2.07	0.33	3.51	3.56	0.34	2.22	4.21	-11.00%	
23+800	0.07%	6.33	2.49	0.45	3.61	3.42	0.36	2.38	5.40	0.07%	
24+000	0.07%	5.56	2.19	0.64	3.59	3.63	0.63	1.48	6.04	1.44%	
24+200	0.07%	7.82	3.18	0.98	3.98	3.86	0.37	2.13	4.73	0.07%	
24+400	0.07%	5.91	2.04	0.14	3.40	3.72	0.32	1.90	6.22	-19.00%	
24+600	0.07%	5.13	2.37	0.52	3.58	3.49	0.17	1.70	4.81	-8.29%	
24+800	0.07%	6.04	2.46	0.28	3.70	3.49	0.21	1.82	3.65	-73.00%	

25+000	-35.00%	4.62	1.11	0.19	3.52	3.97	0.51	2.78	4.51	-4.60%
25+200	9.29%	5.24	2.87	0.63	3.73	3.61	0.18	1.39	4.86	0.07%
25+400	1.65%	5.29	1.75	0.30	3.53	3.58	0.30	2.28	4.92	0.07%
25+600	-19.00%	5.22	1.76	0.57	3.86	3.91	0.79	2.78	6.03	5.63%
25+800	-25.00%	5.72	1.70	0.42	3.74	3.97	0.37	2.10	7.73	-7.02%
26+000	-4.27%	4.80	1.72	0.56	3.46	3.51	0.50	2.16	6.20	0.07%
26+200	-11.00%	2.50	1.49	0.49	3.48	3.54	0.76	2.20	6.18	-13.00%
26+400	-6.48%	6.11	1.80	0.41	3.58	3.90	0.27	1.46	3.97	-20.00%
26+600	-33.00%	4.71	1.58	0.56	3.54	3.50	0.56	2.02	3.67	2.95%
26+800	-36.00%	4.64	1.89	0.58	3.59	3.60	0.44	1.56	3.55	-33.00%
27+000	-20.00%	3.97	2.39	0.66	3.54	3.53	0.32	1.69	3.47	-6.52%

Completando así el proceso de hermanamiento digital de la carretera de primera clase PE-34B en formato DWG que comprende distintos componentes, como carriles, bermas, sobreechamientos y taludes. Es posible agregar datos adicionales a estos componentes.

E. Condición de la carretera

Se evaluó el cumplimiento de las dimensiones de los componentes de la carretera según la norma DG-2018. En la Tabla IX, el ancho del carril varía de 3.37m a 3.97m, incumpliendo el mínimo de 3.60m en ciertas secciones para carreteras de primera clase. El ancho máximo de las bermas es de 0.99 m, que no cumple con el mínimo de 1.30m.

La evaluación de la condición de la carretera en el tramo comprendido desde el km 17+000 hasta el km 17+200 se detalla en la Tabla X. La calzada tiene un ancho de 7.13m, lo que resulta en un área de sección evaluada de 1426m². Se observa presencia de piel de cocodrilo, ahuellamiento, fisuras longitudinales y transversales en el carril, así como deterioro longitudinal en las bermas, obteniendo un puntaje de 121.05. Sin embargo, la medición de la profundidad del ahuellamiento está limitada. La clasificación es de 878.95 lo que indica una condición buena que requiere mantenimiento rutinario.

TABLA X
EVALUACIÓN POR TIPO DE DETERIORO O FALLA DEL PAVIMENTO FLEXIBLE POR SECCIONES DE 200M.

Clasificación de los deterioros / Fallas	Código	Deterioro / Fallas	Unid.	Extensión Promedio Ponderada	0: Sin Deterioro o sin fallas	Condición de Deterioro o Falla			Puntaje de Condición Resultante
						1: Leve Efp = Menor a 10%	2: Moderado Efp = entre 10% y 30%	3: Severo Efp = Mayor a 30%	
Deterioro o Falla Estructural	1	Piel de cocodrilo	m ²	3.30		6.44			6.44
Deterioro o Falla Estructural	2	Fisuras longitudinales	m ²	0.76		1.44			1.44
Deterioro o Falla Estructural	3	Deformación por deficiencia estructural	m ²	0.00	Sin Deterioro	0.00			0.00
Deterioro o Falla Estructural	4	Ahuellamiento	m ²	24.86			78.70		78.70
Deterioro o Falla Estructural	5	Reparaciones o Parchados	m ²	2.22		4.00			4.00
Deterioro o Falla Estructural	6	Peladuras y desprendimientos	m ²	0.98		1.76			1.76
Deterioro o Falla Superficial	7	Baches (huecos)	Und.	0.00	Sin Deterioro	0.00			0.00
Deterioro o Falla Superficial	8	Fisuras transversales	m ²	0.53		0.95			0.95
Deterioro o Falla Superficial	9	Exudación	m ²	1.39		2.64			2.64
Berma Pavimentada	10	Daños puntuales	m ²	8.33		15.00			15.00
Berma Pavimentada	11	Desnivel calzada - berma	m	5.33		10.12			10.12
PUNTAJE DE CONDICIÓN									121.05
Clasificación de Condición (1000 - Puntaje de Condición)		Tipo de Condición según Clasificación de Condición			Tipo de Conservación según Clasificación de Condición				
878.95		Condición Bueno			CONSERVACIÓN RUTINARIA				

- Condición malo ≤ 300 (Rehabilitación), condición regular >300 y ≤ 800 (Conservación Periódica), condición bueno >800 y ≤ 1000 (Conservación Rutinario)

- Conservación rutinaria: comprende reparaciones menores en la superficie de la vía, limpieza de calzada, berma, pintado de señalizaciones y sellado de fisuras.

Su la finalidad de retardar el deterioro del pavimento.

Las evaluaciones de las progresivas siguientes siguen la misma secuencia y sus resultados se presentan en la Tabla XI, con una condición buena y deterioro leve, que requiere mantenimiento rutinario para los carriles con pintado correcto de marcas viales exteriores y reconstrucción para las bermas, ajustándose a las dimensiones requeridas.

TABLA XI
EVALUACIÓN DE LA CONDICIÓN Y TIPO DE CONSERVACIÓN DE LA CARRETERA.

Progresivas		Condición		Tipo de condición	Tipo de conservación
Inicio	Final	Puntaje	Clasificación		
Km 17+000	Km 17+200	121.05	878.95	Condición Bueno	CONSERVACIÓN RUTINARIA
Km 17+200	Km 17+400	79.00	921.00	Condición Bueno	CONSERVACIÓN RUTINARIA
Km 17+400	Km 17+600	96.67	903.33	Condición Bueno	CONSERVACIÓN RUTINARIA
Km 17+600	Km 17+800	89.60	910.40	Condición Bueno	CONSERVACIÓN RUTINARIA
Km 17+800	Km 18+000	105.54	894.46	Condición Bueno	CONSERVACIÓN RUTINARIA
Km 18+000	Km 18+200	111.02	888.98	Condición Bueno	CONSERVACIÓN RUTINARIA
Km 18+200	Km 18+400	73.70	926.30	Condición Bueno	CONSERVACIÓN RUTINARIA
Km 18+400	Km 18+600	98.47	901.53	Condición Bueno	CONSERVACIÓN RUTINARIA
Km 18+600	Km 18+800	85.84	914.16	Condición Bueno	CONSERVACIÓN RUTINARIA
Km 18+800	Km 19+000	91.20	908.80	Condición Bueno	CONSERVACIÓN RUTINARIA
Km 19+000	Km 19+200	99.52	900.48	Condición Bueno	CONSERVACIÓN RUTINARIA
Km 19+200	Km 19+400	93.52	906.48	Condición Bueno	CONSERVACIÓN RUTINARIA
Km 19+400	Km 19+600	97.76	902.24	Condición Bueno	CONSERVACIÓN RUTINARIA
Km 19+600	Km 19+800	97.94	902.06	Condición Bueno	CONSERVACIÓN RUTINARIA
Km 19+800	Km 20+000	96.92	903.08	Condición Bueno	CONSERVACIÓN RUTINARIA
Km 20+000	Km 20+200	92.55	907.45	Condición Bueno	CONSERVACIÓN RUTINARIA
Km 20+200	Km 20+400	94.22	905.78	Condición Bueno	CONSERVACIÓN RUTINARIA
Km 20+400	Km 20+600	86.38	913.62	Condición Bueno	CONSERVACIÓN RUTINARIA
Km 20+600	Km 20+800	90.39	909.61	Condición Bueno	CONSERVACIÓN RUTINARIA
Km 20+800	Km 21+000	96.87	903.13	Condición Bueno	CONSERVACIÓN RUTINARIA
Km 21+000	Km 21+200	89.63	910.37	Condición Bueno	CONSERVACIÓN RUTINARIA
Km 21+200	Km 21+400	82.80	917.20	Condición Bueno	CONSERVACIÓN RUTINARIA
Km 21+400	Km 21+600	83.30	916.70	Condición Bueno	CONSERVACIÓN RUTINARIA
Km 21+600	Km 21+800	78.51	921.49	Condición Bueno	CONSERVACIÓN RUTINARIA
Km 21+800	Km 22+000	71.85	928.15	Condición Bueno	CONSERVACIÓN RUTINARIA
Km 22+000	Km 22+200	67.76	932.24	Condición Bueno	CONSERVACIÓN RUTINARIA
Km 22+200	Km 22+400	59.27	940.73	Condición Bueno	CONSERVACIÓN RUTINARIA
Km 22+400	Km 22+600	54.16	945.84	Condición Bueno	CONSERVACIÓN RUTINARIA
Km 22+600	Km 22+800	53.50	946.50	Condición Bueno	CONSERVACIÓN RUTINARIA
Km 22+800	Km 23+000	46.98	953.02	Condición Bueno	CONSERVACIÓN RUTINARIA
Km 23+000	Km 23+200	35.84	964.16	Condición Bueno	CONSERVACIÓN RUTINARIA
Km 23+200	Km 23+400	29.84	970.16	Condición Bueno	CONSERVACIÓN RUTINARIA
Km 23+400	Km 23+600	29.13	970.87	Condición Bueno	CONSERVACIÓN RUTINARIA
Km 23+600	Km 23+800	27.43	972.57	Condición Bueno	CONSERVACIÓN RUTINARIA
Km 23+800	Km 24+000	27.26	972.74	Condición Bueno	CONSERVACIÓN RUTINARIA
Km 24+000	Km 24+200	28.77	971.23	Condición Bueno	CONSERVACIÓN RUTINARIA
Km 24+200	Km 24+400	29.67	970.33	Condición Bueno	CONSERVACIÓN RUTINARIA
Km 24+400	Km 24+600	31.76	968.24	Condición Bueno	CONSERVACIÓN RUTINARIA
Km 24+600	Km 24+800	34.44	965.56	Condición Bueno	CONSERVACIÓN RUTINARIA
Km 24+800	Km 25+000	29.98	970.02	Condición Bueno	CONSERVACIÓN RUTINARIA
Km 25+000	Km 25+200	27.43	972.57	Condición Bueno	CONSERVACIÓN RUTINARIA
Km 25+200	Km 25+400	30.18	969.82	Condición Bueno	CONSERVACIÓN RUTINARIA
Km 25+400	Km 25+600	31.93	968.07	Condición Bueno	CONSERVACIÓN RUTINARIA
Km 25+600	Km 25+800	35.52	964.48	Condición Bueno	CONSERVACIÓN RUTINARIA
Km 25+800	Km 26+000	38.77	961.23	Condición Bueno	CONSERVACIÓN RUTINARIA
Km 26+000	Km 26+200	42.01	957.99	Condición Bueno	CONSERVACIÓN RUTINARIA
Km 26+200	Km 26+400	42.95	957.05	Condición Bueno	CONSERVACIÓN RUTINARIA
Km 26+400	Km 26+600	44.27	955.73	Condición Bueno	CONSERVACIÓN RUTINARIA
Km 26+600	Km 26+800	42.25	957.75	Condición Bueno	CONSERVACIÓN RUTINARIA
Km 26+800	Km 27+000	43.33	956.67	Condición Bueno	CONSERVACIÓN RUTINARIA

- Condición malo ≤ 300 (Rehabilitación), condición regular >300 y ≤ 800 (Conservación Periódica), condición bueno >800 y ≤ 1000 (Conservación Rutinario)

- Conservación rutinaria: comprende reparaciones menores en la superficie de la vía, limpieza de calzada, berma, pintado de señalizaciones y sellado de fisuras. su la finalidad de retardar el deterioro del pavimento.

V. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El método del hermanamiento digital logra un modelo preciso sin encuestas de campo ni documentos de diseño, representando Los componentes primarios de la carretera, siguiendo estándares de ingeniería vial. Concluyendo en la creación eficiente y alta precisión del gemelo digital en una sección de la carretera de primera clase de la Red Vial Nacional (PE-34B) con datos de alta calidad de fotogrametría. No obstante, en áreas montañosas con taludes de múltiples niveles, se tiene que trazar la misma cantidad de polilíneas de talud.

- Se generó la nube de puntos del área de estudio, de una sección de 10 km de la carretera PE-34B y se extrajo la nube de puntos de las marcas viales eliminando valores atípicos causados por errores locales como los automóviles, datos ruidosos, marcas viales cubiertas o desgastadas reduciendo así su influencia.
- Se generó las alineaciones a partir de las marcas viales mediante el ajuste por suavizado de spline y la aplicación del filtro de Hampel. La alineación horizontal presenta un Error Cuadrático Medio de 0.37, un coeficiente de determinación de 1, y la alineación vertical presenta valores de 0.0017 y 1 que indica alta precisión y un buen ajuste a los datos respectivamente.
- Se ensambló la carretera vinculando líneas de control horizontales y verticales ajustados por suavizado de spline y filtro de Hampel a los puntos de restricción flexibles, ajustándose automáticamente a los desplazamientos de las líneas de control. obtuvieron los parámetros de los componentes principales de las secciones transversales de la carretera.
- Se evaluó la condición de la carretera donde se incumple en las dimensiones del carril y las bermas, pero el estado de la carretera es bueno, con defectos menores. Se requiere un correcto pintado de las marcas viales, mantenimiento rutinario para los carriles y la reconstrucción de las bermas.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Huarsaya RE: conceptualización, investigación, metodología, redacción - borrador original, redacción - revisión y edición.

Mayhua PJ: conceptualización, investigación, metodología, redacción - borrador original, redacción - revisión y edición.

Escarsena E: supervisión, validación, redacción - revisión y edición.

REFERENCIAS

- [1] S. M. Easa and F. Wang, "Estimating continuous highway vertical alignment using the least-squares method," *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 37, no. 10, pp. 1362–1370, 2010, doi: [10.1139/L10-088](https://doi.org/10.1139/L10-088).
- [2] L. Garach, J. De Oña, and M. Pasadas, "Determination of alignments in existing roads by using spline techniques," *Math Comput Simul*, vol. 102, pp. 144–152, 2014, doi: [10.1016/j.matcom.2013.12.003](https://doi.org/10.1016/j.matcom.2013.12.003).
- [3] H. Zhang, J. Wei, and X. Zhang, "Comparative Study on Road Plane Alignment Fitting Methods," *Wuhan Ligong Daxue Xuebao (Jiaotong Kexue Yu Gongcheng Ban)/Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science and Engineering)*, vol. 42, no. 4, Aug. 2018, doi: [10.3963/j.issn.2095-3844.2018.04.013](https://doi.org/10.3963/j.issn.2095-3844.2018.04.013).
- [4] F. Jiang, L. Ma, T. Broyd, W. Chen, and H. Luo, "Building digital twins of existing highways using map data based on engineering expertise," *Autom Constr*, vol. 134, Feb. 2022, doi: [10.1016/j.autcon.2021.104081](https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.104081).
- [5] S. Meža, A. Mauko Pranjić, R. Vežočanik, I. Osmokrović, and S. Lenart, "Digital Twins and Road Construction Using Secondary Raw Materials," *J Adv Transp*, vol. 2021, 2021, doi: [10.1155/2021/8833058](https://doi.org/10.1155/2021/8833058).
- [6] W. J. Steyn and A. Broekman, "Development of a Digital Twin of a Local Road Network: A Case Study," *J Test Eval*, vol. 50, no. 6, Nov. 2022, doi: [10.1520/jte20210043](https://doi.org/10.1520/jte20210043).
- [7] D. Aita, "Digitalización en puertos: aplicación de gemelos digitales en la complejidad logística," (*FAL*) *Facilitación Comercio y Logística En América Latina Y El Caribe*, vol. Boletín 393, no. 3, pp. 1–14, Aug. 2022.
- [8] F. Jiang, L. Ma, T. Broyd, W. Chen, and H. Luo, "Digital twin enabled sustainable urban road planning," *Sustain Cities Soc*, vol. 78, Mar. 2022, doi: [10.1016/j.scs.2021.103645](https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103645).
- [9] C. Delgado and J. Nieto, "Análisis y aplicación de gemelos digitales en el sector de la construcción," Grado en Edificación, Universidad de Sevilla, Sevilla, 2022.
- [10] I. Iglesias, R. Campo, and J. Estaire, "La digitalización del ferrocarril," *CEDEX*, vol. 197, pp. 62–73, 2020.
- [11] R. Illmann, M. Rosenberger, and G. Notni, "Overview of the state of the art in the digitization of drivable forestry roads," in *Image Sensing Technologies: Materials, Devices, Systems, and Applications IX*, N. K. Dhar, A. K. Dutta, S. R. Babu, and K. K. Son, Eds., SPIE, May 2022. doi: [10.1117/12.2622738](https://doi.org/10.1117/12.2622738).
- [12] D. G. J. Opoku, S. Perera, R. Osei-Kyei, and M. Rashidi, "Digital twin application in the construction industry: A literature review," *Journal of Building Engineering*, vol. 40, Aug. 2021, doi: [10.1016/j.jobbe.2021.102726](https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102726).
- [13] F. Toala, K. Maldonado, M. Toala, and J. Álava, "Gemelos Digitales en la Industria," *Revista Científica Arbitrada Multidisciplinaria Pentaciencias*, vol. 4 no. 1, pp. 75–83, Mar. 2022.
- [14] M. Varas, J. C. García, M. E. Bustamante, and C. Bustamante, "Gemelos digitales y su evolución en la industria," *Recimundo*, vol. 4, no. 4, pp. 300–308, Nov. 2020, doi: [10.26820/recimundo/4](https://doi.org/10.26820/recimundo/4).
- [15] O. El Marai, T. Taleb, and J. Song, "Roads Infrastructure Digital Twin: A Step Toward Smarter Cities Realization," *IEEE Netw*, vol. 35, no. 2, pp. 136–143, Mar. 2021, doi: [10.1109/MNET.011.2000398](https://doi.org/10.1109/MNET.011.2000398).
- [16] D. Pareja and R. Lacalle, "Monitorización de la Integridad Estructural de un Componente mediante Gemelos Digitales," Máster Universitario en Integridad y Durabilidad de Materiales, Componentes y Estructuras, Universidad de Cantabria, Santander, 2020.
- [17] S. Hakdaoui, A. Emaran, and F. Oumghar, "Mobile Mapping, Machine Learning and Digital Twin for Road Infrastructure Monitoring and Maintenance: Case Study of Mohammed VI Bridge in Morocco," *IEEE International conference of Moroccan Geomatics (Morgeo)*, Casablanca, Marruecos, vol. 978, no. 1, pp. 1–6, May 2020, doi: [10.1109/Morgeo49228.2020.9121882](https://doi.org/10.1109/Morgeo49228.2020.9121882).
- [18] H. Fretes and M. Gómez, "Implementación de fotogrametría digital aplicada a imágenes aéreas," Argentina, Oct. 2018.
- [19] Hazi Maps, "Tecnología LIDAR. de la teoría a la práctica," Sep. 2018.
- [20] X. Li, C. Liu, Z. Wang, X. Xie, D. Li, and L. Xu, "Airborne LiDAR: state-of-the-art of system design, technology and application," *Meas Sci Technol*, vol. 32, no. 3, p. 032002, Mar. 2021, doi: [10.1088/1361-6501/abc867](https://doi.org/10.1088/1361-6501/abc867).
- [21] O. Z. Jasim, "Using of machines learning in extraction of urban roads from DEM of LIDAR data: Case study at Baghdad expressways, Iraq," *Periodicals of Engineering and Natural Sciences (PEN)*, vol. 7, no. 4, pp. 1710–1721, Oct. 2019.
- [22] S. Biçici and M. Zeybek, "An approach for the automated extraction of road surface distress from a UAV-derived point cloud," *Autom Constr*, vol. 122, Feb. 2021, doi: [10.1016/j.autcon.2020.103475](https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103475).
- [23] I. Díaz, P. Citton, S. de Valais, and E. García, "La fotogrametría se convierte en una poderosa herramienta para la conservación y difusión del patrimonio paleontológico.," *Revista PH Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico*, vol. 26, no. 94, pp. 20–22, Jun. 2018, doi: [10.33349/2018.0.4191](https://doi.org/10.33349/2018.0.4191).

- [24] A. M. Oliveras and B. Parés, “Modelización 3D de un dolium romano a partir de técnicas combinadas de metrología dimensional y fotogrametría digital,” *Academia, Accelerating world’s research*, vol. 58, pp. 947–972, 2020.
- [25] J. Bejarano and J. Palomino, “Análisis comparativo del levantamiento fotogramétrico y estación total en el diseño geométrico de la carretera de evitamiento progresiva 0+000 al 3+837.26 km - Otuzco, La Libertad, Perú 2021.,” Transporte, Universidad Privada Antenor Orrego, Trujillo, 2022.
- [26] A. Suárez, “Caracterización topográfica de la laguna sagrada de siecha (PNN Chingaza), utilizando nubes de puntos de alta densidad.,” Ingeniería Topográfica Bogota D.C., Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogota, 2019.
- [27] F. Santana, D. De la cruz, and I. Alonso, “Detección e identificación de obstáculos a partir de una nube de puntos,” Tecnologías de la Telecomunicación, Universidad de las Palmas de Gran Canaria, Las Palmas de Gran Canaria, 2021.
- [28] L. Liu and S. Lim, “Color Component–Based Road Feature Extraction from Airborne Lidar and Imaging Data Sets,” *Journal of Surveying Engineering*, vol. 143, no. 1, Feb. 2017, doi: [10.1061/\(asce\)su.1943-5428.0000198](https://doi.org/10.1061/(asce)su.1943-5428.0000198).
- [29] F. Tao, H. Zhang, A. Liu, and A. Y. C. Nee, “Digital Twin in Industry: State-of-the-Art,” *IEEE Trans Industr Inform*, vol. 15, no. 4, pp. 2405–2415, Apr. 2019, doi: [10.1109/TII.2018.2873186](https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873186).
- [30] M. Sakin and Y. C. Kiroglu, “3D Printing of Buildings: Construction of the Sustainable Houses of the Future by BIM,” in *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, 2017, pp. 702–711. doi: [10.1016/j.egypro.2017.09.562](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.562).
- [31] F. Tao and M. Zhang, “Digital Twin Shop-Floor: A New Shop-Floor Paradigm Towards Smart Manufacturing,” *IEEE Access*, vol. 5, pp. 20418–20427, Sep. 2017, doi: [10.1109/ACCESS.2017.2756069](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2756069).
- [32] Q. Qi *et al.*, “Enabling technologies and tools for digital twin,” *J Manuf Syst*, vol. 58, pp. 3–21, Jan. 2021, doi: [10.1016/j.jmsy.2019.10.001](https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.10.001).
- [33] MTMAU, 8.2 - *IC Marcas viales de la instrucción de carreteras*. España: Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbanas, 2020.
- [34] MTC, *Manual de dispositivos de control del tránsito automotor para calles y carreteras*. Perú: Ministerio de Transporte y Comunicaciones, 2016.
- [35] MTC, *Manual de Carreteras: Mantenimiento o Conservación Vial*, Edición Lima. Perú: Dirección General de Caminos y Ferrocarriles, Dirección de Normatividad Vial, 2016. www.mtc.gob.pe