

GUIA TECNICA INGENIERIA GEOMATICA Y GEOESPACIAL

Noviembre 2024

INDICE

1

CAPITULO 1 - INTRODUCCIÓN

1.1	Sistemas de medición y captura de datos	3
1.2	Aplicaciones de los sistemas de medición y captura	9
1.3	Clasificación de procesos	9
1.4	Tipología de resultados	13

CAPITULO 2 - REDES GEODÉSICAS Y NIVELACIÓN DE ALTA PRECISIÓN

2.1	Introducción	22
2.2	Red Básica	23

CAPITULO 3 - GEOMATICA APLICADA A LAS INFRAESTRUCTURAS FERROVIARIAS

3.1	Introducción	29
3.2	Levantamiento de la Plataforma	30
3.3	Levantamiento ESTRUCTURAS	37
3.4	Levantamiento de Terraplenes y Trincheras	40
3.5	Levantamiento de Túneles	41
3.6	Levantamiento de SUPERESTRUCTURA	44

CAPITULO 4 - GEOMATICA APLICADA A LA EDIFICACION

4.1	Introducción	50
4.2	Levantamiento de estaciones y edificios técnicos	51

CAPITULO 5 - INGENIERÍA GEOESPACIAL APLICADA

5.1	Introducción	56
5.2	Obtención y Producción de Información Georreferenciada	58
5.3	Diseño y Gestión de Bases de Datos Georreferenciadas	65

CAPITULO 1- INTRODUCCIÓN

1.1 SISTEMAS DE MEDICIÓN Y CAPTURA DE DATOS

1.1.1 MEDICIÓN Y CAPTURA DIRECTA

Los equipos de medición y captura directa son los que, operados y/o supervisados adecuadamente por un técnico cualificado, son capaces de obtener información geométrica del objeto de estudio desde el entorno próximo o ubicados sobre el mismo objeto en cuestión. Pertenecen a esta clasificación los equipos y sistemas topográficos y geomáticos.

De una forma genérica, clasificamos los equipos según 2 parámetros: geoposicionamiento y captura masiva.

1.1.1.1 Equipos de geoposicionamiento

Equipos de nivelación geométrica

El nivel óptico es el equipo que permite el cálculo directo del desnivel entre 2 puntos.

Equipos de topografía clásica y nivelación trigonométrica

Las estaciones totales (manuales, robóticas o automáticas) son los equipos que permiten la observación directa de ángulos y distancias, y permiten el cálculo directo de la posición relativa entre puntos, tanto en planimetría como en altimetría. Al desnivel calculado entre 2 puntos con estos métodos se le denomina nivelación trigonométrica.

Además, permiten según el método aplicado, el cálculo de poligonales o itinerarios precisos, redes geodésicas, trilateraciones, intersecciones directas o inversas, auscultaciones topográficas o también la radiación de puntos discretos.

Equipos GNSS

Estos equipos reciben y procesan las señales adecuadas procedentes de los sistemas GNSS (GPS, Glonass, Galileo, Beidou, EGNOS, WAAS, QZSS, GAGAN...), con el fin de dotar al usuario de una posición precisa en un marco geodésico y cartográfico determinados.

GPS (USA), Glonass (Rusia), Galileo (Europa) y Beidou (China) son las constelaciones de satélites de navegación, que emiten señales de diferentes características con el fin de que los receptores en tierra las escuchen, capturen y procesen. El resultado será una posición única, cuya precisión dependerá tanto del instante en que se realice la observación como del método de observación y cálculo seleccionado: PPS (estático), PPK (cinemático) o RTK (cinemático en tiempo real).

EGNOS (Europa), WAAS (USA), QZSS (Japón) y GAGAN (India) son las constelaciones de satélites de aumentación, que emiten señales complementarias a las de navegación, con el fin de otorgar mayor precisión a la navegación en tiempo real y sin necesidad de un cálculo diferencial con una base en tierra.

Equipos inerciales (IMU) y odómetros

Son equipos que permiten, con el uso de giróscopos y acelerómetros, la definición de una trayectoria precisa a lo largo del tiempo y del espacio, y complementan a los sistemas GNSS para ayudar a proyectar dicha trayectoria en zonas de baja o nula cobertura satelital (zonas de trinchera, cobertura arbolada densa o incluso túneles).

El odómetro, además, complementa al IMU cuando los sensores GNSS no disponen de ninguna información, dotando al conjunto de datos precisos del desarrollo longitudinal de la trayectoria.

1.1.1.2 Equipos de captura masiva

Fotogrametría

Un equipo fotogramétrico está dotado de una cámara calibrada específica para la obtención de fotogramas, aéreos o terrestres, orientados hacia el objeto de estudio y convergentes entre sí. Según las características de la cámara y del método de captura, podremos obtener diferentes resultados, pero siempre aplicando el “proceso fotogramétrico” que permite la restitución planimétrica y altimétrica del conjunto, esto es, la representación en 3D de toda la zona de estudio.

Además, el proceso permite la obtención de mosaicos fotográficos y aún mejor, de ortofotoplanos u ortofotografías cenitales o laterales. Estas últimas tienen la ventaja de ser herramientas métricas precisas sobre las cuales identificar y cuantificar geometrías.

LIDAR, láser escáner y perfilómetro

Aunque la terminología LIDAR (Light Detection and Ranging) engloba a todos los anteriores, se acaba utilizando mayoritariamente este término para los sistemas aerotransportados (con drones /UAV o aeronaves tripuladas) que permiten la captura del terreno con interferometría láser. Combinan la captura masiva de puntos con diferentes equipos de geoposicionamiento, para el cálculo de su ubicación en el espacio y su trayectoria precisa en cada instante.

Láser escáner terrestre hace referencia a los equipos “LIDAR” terrestres, que capturan una nube de puntos desde una posición estática. Realizando múltiples barridos desde ubicaciones diferentes, y utilizando métodos y software de registro específicos, el resultado es la obtención de una nube de puntos consolidada y coherente, de precisión en muchos casos milimétrica. No debemos confundir estos sistemas con los que utilizan la luz estructurada o el infrarrojo como tecnología interferométrica, cuyos resultados son de dudosa precisión y normalmente combinan la geometría con fotogramas 360° HDR para su uso comercial, pero no con rigor geométrico.

El perfilómetro es un equipo “LIDAR” que se utiliza en sistemas dinámicos como el mobile mapping, y que obtiene perfiles transversales a la trayectoria, con mucha precisión y resolución, a través de un sensor muy potente y con mucha capacidad de rotación.

1.1.1.3 Sistemas de medición y captura directa

Combinando equipos de geoposicionamiento y equipos de captura, y aplicando los métodos topográficos y geomáticos necesarios, podemos diferenciar los sistemas de medición y captura directa en los siguientes:

Sistemas de Fotogrametría Aérea

Sea con drones / UAV o con aeronaves tripuladas, los sistemas de fotogrametría aérea combinan la medición de la posición y/o trayectoria en el aire con la captura de fotogramas aéreos, cenitales u oblicuos.

Para el cálculo de la posición y/o trayectoria de la aeronave, los sistemas de fotogrametría aérea utilizan 1 o 2 antenas GNSS y sistemas inerciales (IMUs).

Para la captura de fotogramas, utilizan cámaras específicas calibradas para tal fin.

Es imprescindible el levantamiento de puntos de control o GCPs sobre el terreno con el fin de dotar al conjunto tanto de coherencia dimensional como de un sistema de georreferenciación. La captura de estos puntos se realizará por métodos topográficos clásicos. Las precisiones y características de estos puntos se definen en el apartado [1.3.5. Ground Control Points \(GCPs\)](#).

Sistemas LIDAR Aerotransportados

Al igual que en el caso anterior, estos sistemas pueden ser embarcados en drones o en aeronaves tripuladas, dependiendo del alcance y amplitud geográfica del proyecto. Y también, al igual que en el caso anterior, combinan la medición de la posición y/o trayectoria en el aire con la captura masiva, pero en este caso con equipos LIDAR, y en muchos casos, también con cámaras específicas calibradas.

De este modo, en este último supuesto, los sistemas permiten la obtención de la geometría del terreno en 3D por medio de una nube de puntos, y la de una ortofotografía georreferenciada, métrica y en 2D.

Al igual que con los Sistemas de Fotogrametría Aérea, es imprescindible el levantamiento de puntos de control o GCPs sobre el terreno con el fin de dotar al conjunto tanto de coherencia dimensional como de un sistema de georreferenciación. La captura de estos puntos se realizará por métodos topográficos clásicos. Las precisiones y características de estos puntos se definen en el apartado [1.3.5. Ground Control Points \(GCPs\)](#).

Sistemas Láser Escáner Terrestre

Aunque estos sistemas por sí solos normalmente no disponen de un método de geoposicionamiento autónomo, sus resultados son fácilmente integrables en el marco topográfico o geodésico, sin más que con la utilización e identificación de puntos homólogos o GCPs (Ground Control Points). Estos puntos habrán sido observados por métodos topográficos clásicos o sistemas GNSS, y su correspondencia con la nube de puntos ofrecerá un resultados directo y georreferenciado.

Los sistemas láser escáner terrestre ofrecen una nube de puntos 3D de alta resolución y calidad en entornos de interior y exterior, pero siempre posicionados sobre un trípode en la zona de estudio.

Hay que hacer mención especial al carácter rigurosamente métrico de estos equipos, ya que los resultados directos que ofrecen carecen de la aplicación de un factor de escala necesario en proyectos de ámbito cartográfico, donde las grandes distancias y dimensiones de la infraestructura hacen necesaria la aplicación de sistemas de representación gráfica utilizando una proyección, en nuestro caso UTM.

Sistemas Láser Escáner Móvil o SLAM

Esta tecnología consta de un sistema de geoposicionamiento relativo a base de algoritmos que permiten la construcción de un mapa 2D a medida que el sensor LIDAR captura y se mueve al mismo tiempo. El resultado es una nube de puntos 3D consolidada y coherente que, aunque requiere de software adicional para el registro completo y de un control geométrico en zonas amplias, ofrece un gran rendimiento y calidad, siempre y cuando el método de trabajo sea el correcto.

Para la georreferenciación del conjunto se utilizarán puntos de control terrestres, tal y como se describe en el apartado [1.3.5 Ground Control Points \(GCPs\)](#).

Sistemas Mobile Mapping

Los sistemas mobile mapping disponen de 2 conjuntos de sensores, o 2 subsistemas:

- Subsistema de posicionamiento y trayectoria: GNSS, IMU y/o odómetro.
- Subsistema de captura: LIDAR (perfilómetro), cámaras RGB y/o cámaras 360º.

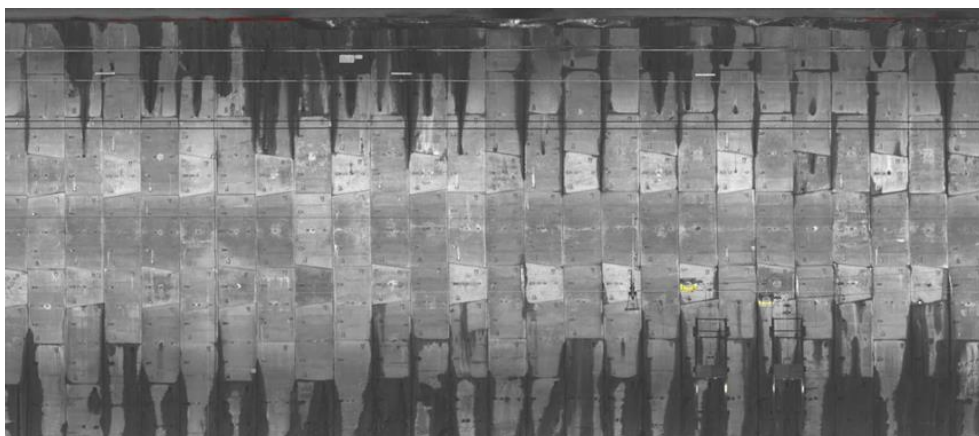
El propósito de estos sistemas es la captura en dinámico de infraestructuras lineales (viarias o ferroviarias). La velocidad de captura puede variar en función al objetivo final del proyecto, pero normalmente es inversamente proporcional a la resolución y a la precisión final obtenida: a menor velocidad, mayor resolución y precisión. Es decir, a velocidades altas la resolución y la precisión final serán bajas, mientras que a medida que podamos disminuir la velocidad aumentarán resolución y precisión. Existe un límite (unos 10 km/h) a partir del cual la disminución de la velocidad no ofrece ninguna ventaja, e incluso empeora las precisiones de la trayectoria si no disponemos de cobertura GNSS suficiente.

En cualquier caso, y al igual que con el resto de sistemas, es necesario el levantamiento de puntos de control o GCPs ([1.3.5. Ground Control Points](#)). Servirán tanto para el ajuste de la trayectoria como para el control de calidad del resultado.

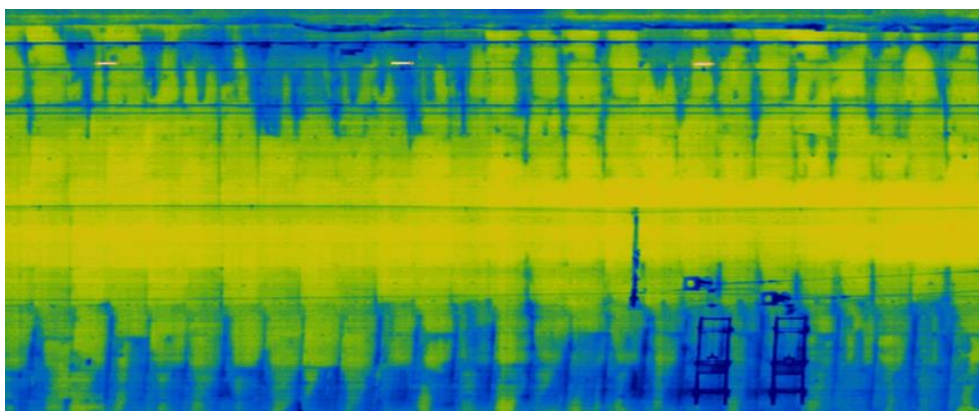
Sistemas de Inspección Automatizada (túneles)

Una evolución de los sistemas mobile mapping son los sistemas de inspección automatizada que, incorporando además sensores termográficos, permite la captura milimétrica del interior de la sección de un túnel (bóveda, hastiales y contrabóveda) sobre la cual realizar un análisis y mapeado de deficiencias y fisuración. Los resultados directos de la captura son 3 canales de información diferenciados:

- Canal visible o imagen albedo: resultante de la representación de reflectancias del LIDAR, este canal representa en B/N un fotograma plano del desarrollo de la sección del túnel.



- Canal infrarrojo o termográfico: resultante de la fusión de fotogramas termográficos, permite la identificación de "puntos fríos" y zonas húmedas, incluso a través de impermeabilizaciones y parches.



- Canal 3D o gálipos: resultante del seccionamiento transversal de la nube de puntos 3D, permite la representación geométrica precisa de cualquier sección transversal del túnel, así como el análisis de gálipos.

En muchos proyectos la inspección automatizada es independiente de la captura del trazado longitudinal del túnel (alineación en planta y perfil longitudinal en alzado), en cuyo caso se podría prescindir del subsistema de posicionamiento y/o trayectoria.

Sistemas de Auscultación Topográfica Automática o Monitorizada

Cabe destacar como un sistema independiente la auscultación topográfica automática o monitorizada. En sí misma, la auscultación topográfica es solo una parte de un concepto de Auscultación mucho más general (instrumentación y control, modelado y vigilancia), siendo la Auscultación la obtención sistemática de datos cuantitativos que permitan observar el funcionamiento de una estructura con una finalidad específica. En

nuestro ámbito, el terreno está incluido en la estructura. Por eso es un concepto general más ligado a la ingeniería geotécnica que a la ingeniería topográfica.

La auscultación topográfica automática o monitorizada consiste en un control geométrico intenso, de alta precisión, aplicado tanto al desplazamiento de una ladera como al provocado en el asentamiento de la estructura de un edificio.

A continuación, se muestra un resumen con los equipos y sistemas descritos:

SISTEMAS	Tecnologías										
	de Posicionamiento					de Captura			de Transporte		
	GNSS	IMU	ODO	SLAM	ET	LIDAR	FOTO	TERMÓ	DRONE	AUTO	APIE
· de Fotogrametría Aérea	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>					<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>		
· LIDAR aerotransportado	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>		
· Láser Escaner Terrestre						<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>
· Láser Escáner Móvil o SLAM				<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>
· Mobile Mapping	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>	
· de Inspección Automatizada	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	
· de Auscultación Topográfica					<input checked="" type="checkbox"/>						

1.1.2 MEDICIÓN Y CAPTURA INDIRECTA

Los sistemas de medición y captura indirecta utilizan el satélite artificial como vehículo principal para el transporte de sensores que capturan, o bien la radiación proveniente de la superficie terrestre (sistemas pasivos), o bien el reflejo sobre esta superficie de una o varias señales emitidas por estos mismos sistemas satelitales (sistemas activos).

1.1.2.1 Plan Nacional de Teledetección y PNOA

La teledetección es la técnica de adquisición de datos de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales. La interacción electromagnética entre el terreno y el sensor, genera una serie de datos que son procesados posteriormente para obtener información interpretable de la Tierra.

Desde el año 2005 se adquieren y procesan imágenes de distintos satélites comerciales con distintos tamaños de píxel y cada año más organismos públicos hacen un uso sistemático de ellas. Según las condiciones negociadas con las empresas suministradoras, las imágenes tienen licencia de uso multiusuario para las Administraciones Públicas.

Dentro del PNT está integrado el Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA), que tiene como objetivo la obtención de coberturas con vuelos fotogramétricos, obteniendo modelos digitales del terreno y ortofotos digitales en color. Dentro de este plan se encuentra PNOA-LiDAR cuyo objetivo es cubrir todo el territorio de España mediante nubes de puntos con coordenadas X, Y, Z obtenidas mediante sensores LiDAR aerotransportados, con una densidad de 0,5 puntos/m. Tienen múltiples aplicaciones: MDT, MDS, estudios de zonas inundables, etc.

1.1.2.2 Programa Copernicus, imágenes Sentinel

Las imágenes de los satélites Sentinel del El Programa Copernicus, tanto para territorio nacional como europeo e internacional, que están a disposición del público general con acceso libre y gratuito son:

- Sentinel-1, que proporcionan imágenes radar terrestres y oceánicas.
- Sentinel-2, que proporcionan imágenes ópticas terrestres, están disponibles como productos nivel 1C (corregidos radiométrica y geoméricamente) y nivel 2A (corregido atmosféricamente).

- Sentinel-3, proporciona servicios globales de vigilancia terrestre y oceánica.
- Sentinel-4, proporciona datos para la vigilancia de la composición atmosférica.
- Sentinel-5, también proporciona datos para la vigilancia de la composición atmosférica.
- Sentinel-6, proporciona datos altimétricos de alta precisión

A continuación, se facilita un enlace para la descarga de datos procedentes del programa Copernicus:

- Datos: <https://dataspace.copernicus.eu/>

1.1.2.3 Técnicas INSAR

Las técnicas de interferometría SAR (InSAR) son capaces de proporcionar cambios de posición de los puntos sobre la superficie terrestre haciendo uso de imágenes radar adquiridas en épocas distintas sobre las zonas de interés.

Los datos de origen son imágenes SAR en banda-C de la constelación de satélites Sentinel-1A y Sentinel-1B del Programa Copernicus de la Unión Europea. Los satélites Sentinel-1 están equipados con un radar de apertura sintética (SAR) de onda microondas que opera en banda C. Los Sentinel-1 realizan una órbita polar, helio-síncrona, a una altitud de 693 km. Un solo satélite Sentinel-1 cartografía el planeta completo en el modo de adquisición IW cada 12 días. La constelación de dos satélites ofrece un ciclo de repetición de 6 días en el Ecuador.

El servicio proporciona una nube de puntos de las que se ha calculado la serie temporal de deformaciones en el período analizado. El servicio está disponible en todo el planeta. Adicionalmente se puede proporcionar un visor web que analiza de forma visual e interactiva las series temporales de movimientos del terreno e infraestructuras facilitando la interpretación de resultados y la toma de decisiones.

A continuación, se facilita un enlace para la descarga de software de procesamiento de datos:

- Software SNAP: <https://step.esa.int/main/download/snap-download/>

1.1.2.4 Vuelo LIDAR 2017 del Gobierno Vasco

Aunque los vuelos LIDAR aerotransportados contratados por el Gobierno Vasco pueden clasificarse como métodos directos, al realizarse con aeronaves tripuladas, equipos LIDAR específicos de muy alto rango (alcance) y a una altura sobre el terreno mucho mayor a la que operan los drones /UAV (cuya altura máxima de operación es de 120 metros / 400 pies), podemos denominar estos métodos de trabajo como indirectos por su carácter cartográfico y la amplitud geográfica de su alcance.

El vuelo LIDAR 2017 es el último vuelo realizado hasta la fecha de redacción del presente documento, y se prevé que la siguiente misión se desarrolle durante el primer semestre de 2025 (tercera cobertura).

Los datos del vuelo LiDAR de la Comunidad Autónoma del País Vasco que se ha realizado entre las fechas 2017/05/23 y 2017/10/11 cuenta con una densidad de 2,2 pto/m² y se distribuye en ficheros binarios .las por hojas de 500m x 500m. El sistema geodésico de referencia es ETRS89, en proyección UTM huso30 y cotas ortométricas en base al nuevo modelo del geoide EGM08_RED NAP. La realización de este vuelo se enmarca dentro del proyecto europeo LIFE14 ENV/ES/000179 HEALTHY FOREST sobre la temática de sanidad forestal y ha contado con el apoyo del Gobierno Vasco mediante la participación del Servicio de Información del Territorio.

El visor geoeuskadi dispone de los datos abiertos en el siguiente enlace:

<https://www.geo.euskadi.eus/webgeo00-dataset/es/?r01kQry=tC%3Aeuskadi%3BtF%3Aopendata%3Bm%3AdocumentLanguage.EQ.es%2C.opendataLabels.LIKE.LIDAR%3B>

1.2 APLICACIONES DE LOS SISTEMAS DE MEDICIÓN Y CAPTURA

El siguiente cuadro muestra la relación entre las diferentes tipologías de proyectos o aplicaciones y cada uno de los sistemas descritos:

	Fotogrametría Aérea	LIDAR Aerotransp.	Láser Escáner Terrestre	Láser Escáner Móvil	Mobile Mapping	Inspección Automatizada	LIDAR Gobierno Vasco	Técnicas INSAR	Ortofoto PNOA
Anteproyectos y Estudios Previos	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Proyectos Constructivos	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>				
Proyectos de Rehabilitación	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>			
Mantenimiento y Conservación			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Peritajes y Documentación	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>			
Infraest. Ferroviarias - VIA			<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>				
Infraest. Ferroviarias - TUNEL			<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>			
Infraest. Ferroviarias - VIADUCTO		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>	
Infraest. Ferroviarias - SERVIDUMBRE		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>
Infraest. Ferroviarias - INSTALACIONES			<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>				
Arquitectura y Edificación			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>		

1.3 CLASIFICACIÓN DE PROCESOS

Tanto la topografía como la cartografía son ciencias dedicadas al estudio de la Tierra y sus formas, si bien difieren en su objeto de estudio. El objeto de estudio de la topografía es la forma de la Tierra, describiendo sus características físicas y accidentes geográficos de la misma. Podríamos decir, a resumidas cuentas, que su objetivo es la medición de la Tierra.

Por su parte, el objeto de estudio de la cartografía es la elaboración, diseño e interpretación de los mapas geográficos a partir de las mediciones que aporta la topografía. De manera resumida, podríamos decir que su objetivo de estudio es la representación de la Tierra.

Además, diferenciaremos en este apartado otros procesos necesarios para la generación de un marco geodésico coherente, así como el apoyo y el control de las diferentes capturas masivas en dicho marco por medio de GCPs (ground control points).

A continuación, se identifican y describen los diferentes métodos y procesos, en líneas generales, que se pueden utilizar en cualquier proyecto de ingeniería de obra civil, dentro del ámbito ferroviario:

1.3.1 PROCESOS TOPOGRÁFICOS

La Topografía y la Geodesia tienen como objetivo común la determinación y representación de la forma, dimensiones y ubicación de una porción de la superficie terrestre. La determinación de estos atributos se consigue a través de la ubicación espacial de los puntos que conforman la superficie terrestre respecto de un sistema de referencia dado (sistema de coordenadas). Como son infinitos los puntos que determinan la topografía, se eligen aquellos puntos característicos que mejor la describan. Para ello se estudian las técnicas, métodos e instrumentos de medición y cálculo para determinar las coordenadas de puntos, elevaciones, áreas, volúmenes, etc., para así cumplir con su objetivo.

La Topografía tiene una importancia trascendental en la ingeniería civil, minera e industrial. La mayor parte de la actividad profesional está enfocada hacia la realización de proyectos y ejecución de obras. En ambas facetas, la Topografía juega un papel de extraordinaria importancia, sustentada en las fases significativas siguientes:

- **Levantamientos topográficos:** captura de la información geográfica a escalas convenientes.
- **Producción cartográfica:** generación y gestión de mapas y planos.
- **Proyecto constructivo:** definición geométrica de la obra.
- **Replanteo planimétrico y altimétrico** de cualquier eje.
- **Control, ejecución y medición** de la obra.

En Ingeniería Civil, los condicionantes topográfico-cartográficos suponen un gran despliegue de medios y recursos humanos cualificados. Diseñar un adecuado enfoque topográfico en el proyecto y en la construcción de una determinada actuación repercute de forma directa en la propia gestión (económica, rendimientos, plazos, ...).

1.3.2 PROCESOS CARTOGRÁFICOS

La cartografía tiene como finalidad la concepción, preparación, redacción y realización de todos los tipos de mapas, planos y cartas. Implica el estudio de la expresión gráfica de los fenómenos a representar y engloba el conjunto de operaciones que partiendo de los datos de campo o documentos recogidos finaliza en la impresión y utilización del mismo. Constituye una transcripción gráfica de los fenómenos geográficos.

Se denomina mapa a toda representación plana de una parte de la superficie terrestre que, por su extensión y debido a la curvatura de la superficie de la Tierra, requiere hacer uso de sistemas especiales de transformación propios de la Geodesia y de la Cartografía Matemática. La relación entre medidas en campo y medidas en el plano no es constante, y está directamente relacionada con el coeficiente de anamorfosis lineal, en proyecciones UTM (común y erróneamente llamado factor de escala UTM).

En cambio, se llama plano a la representación gráfica que por la escasa extensión de superficie a que se refiere no exige hacer uso de los sistemas cartográficos. El plano representa una superficie donde se prescinde de la curvatura de la Tierra. La relación entre medidas en campo y medidas en el plano puede considerarse constante.

El plano o mapa constituye el soporte de información y comunicación más usual, a pesar de su abstracción y subjetividad. Entendiendo el mapa como medio de comunicación, el proceso cartográfico ha de cuidarse para conseguir una transmisión eficaz y precisa de la información.

Con la puesta a punto de los equipos electrónicos (estaciones topográficas y niveles digitales) y la incorporación del Sistema de Posicionamiento Global a los trabajos geodésicos, se ha dado un impulso definitivo a una nueva forma de captar y tratar la información. Una vez obtenida una colección de datos (x, y, z, atributo) relativos a una zona del territorio, es posible configurar una nube de puntos, susceptibles de formar un modelo digital del terreno (MDT).

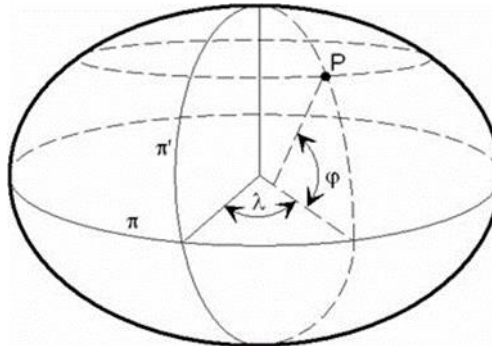
1.3.3 OBSERVACIÓN GEODÉSICA

La Geodesia en su concepto más amplio es la ciencia que estudia la forma y dimensiones de la Tierra. Esto incluye la determinación del campo gravitatorio externo de la tierra y la superficie del fondo oceánico. Dentro de esta definición, se incluye también la orientación y posición de la tierra en el espacio.

La figura "natural" de la Tierra, excluyendo la topografía o forma externa, se asemeja a la definición de **geoide**, definida como una superficie de nivel equipotencial del campo gravitatorio terrestre. Esta superficie equipotencial o de nivel materializado por los océanos cuando se prescinde del efecto perturbador de las mareas (casi la superficie del nivel medio de los mares) es la superficie de referencia para la altitud.

Como la definición matemática del geoide presenta gran complejidad, así como su definición, la superficie de la Tierra puede representarse con mucha aproximación mediante un **elipsoide de revolución**, definiéndose este sistema con:

- Superficie de referencia: Estableciendo sus dimensiones (semiejes a , b).
- Ejes o líneas de referencia en la superficie.
- Sentidos de medida.



Sobre esta superficie se definen las **coordenadas geodésicas**:

- **Latitud geográfica (φ)**: ángulo medido sobre el plano meridiano que contiene al punto entre el plano ecuatorial y la normal al elipsoide en P.
- **Longitud geográfica (λ)**: ángulo medido sobre el plano ecuatorial entre el meridiano origen y el plano meridiano que pasa por P.

El elipsoide de revolución que mejor se adapte al geoide en la zona con un punto donde ambos coinciden o bien la normal a ambos es la solución adoptada, constituyendo el concepto de **Sistema Geodésico de Referencia**. El elipsoide de referencia adoptado en la actualidad para la representación cartográfica en España es el GRS80, y se utiliza como base para la proyección UTM ETRS89.

En geodesia existirán **dos Datum**: el horizontal y el vertical, siendo este último la superficie de referencia respecto a la que se definen las altitudes. En este caso, lo más normal es que sea el geoide. Actualmente utilizamos el modelo de geoide EGM08 para el cálculo directo de elevaciones, sin más que añadiendo el valor que nos aporta EGM08 para cada posición geográfica, a la cota elipsoidal.

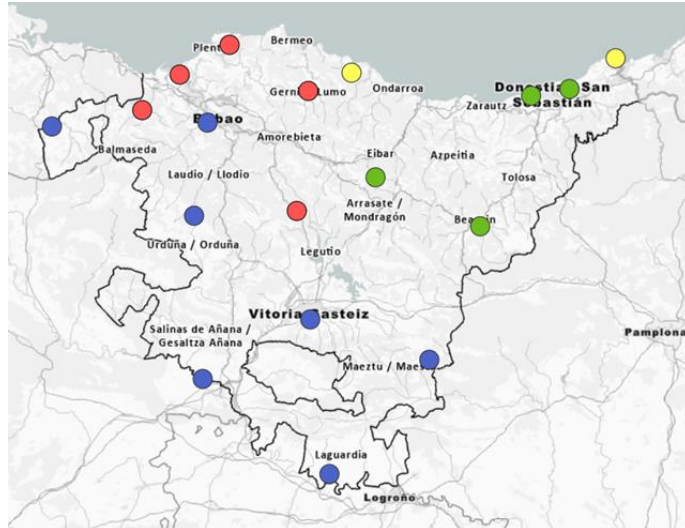
En el Capítulo V – “Ingeniería Geoespacial Aplicada”, punto “2.1. Sistemas Geodésicos y Proyecciones Cartográficas” se encuentra una guía más detallada relacionada con estas cuestiones.

1.3.4 OBSERVACIÓN GEODÉSICA EN EUSKADI

El Gobierno Vasco y las Diputaciones de Gipuzkoa y Bizkaia vienen desarrollando desde 1998 una red de estaciones permanentes GNSS (Global Navigation Satellite System) que cubre todo el territorio de forma homogénea. La red de estaciones permanentes constituye la referencia básica que da acceso al sistema ETRS89 de forma directa. Los objetivos de dicha red se pueden resumir en:

- Obtención de coordenadas muy precisas y campo de velocidades en todos los puntos de la red.
- Contribución a la definición de los nuevos **Sistemas de Referencia Globales (ITRF)** en el territorio nacional.
- Ser puntos fundamentales de la **Red Europea EUREF de estaciones permanentes (EPN)** para la densificación de los marcos globales y definición del sistema ETRS89.
- Utilización de los registros de datos continuos para estudios de Geodinámica, troposfera, ionosfera, meteorología, etc.
- Definir una red fundamental como apoyo para aplicaciones en tiempo real de correcciones diferenciales (DGNSS) y RTK.

- Proporcionar a los usuarios de GNSS, públicamente, los datos para trabajos geodésicos, cartográficos, topográficos y de posicionamiento en general.



1.3.5 GROUND CONTROL POINTS (GCPS)

Un Punto de Control Terrestre (GCP por sus siglas en inglés) es una medición de la posición hecha sobre el terreno, con el fin de servir como referencia y marco en la georreferenciación topográfica de un proyecto. Los puntos de control terrestres se pueden colocar en estructuras existentes como esquinas de pavimento, líneas en un estacionamiento o baldosas de colores contrastantes; de otra manera, se pueden materializar utilizando objetivos colocados en el suelo o dibujando marcas sobre el terreno.

La precisión y el marco de referencia en la observación de los GCPs son parámetros fundamentales que se deben definir antes de su planificación y observación. Así, podremos diferenciar los métodos topográficos utilizados en función al objetivo del proyecto y a la precisión del producto final:

Sistema	GNSS RTK*	GNSS Red RTK*	GNSS Estático*	GNSS Estático largo*	Estación Total**	Nivel óptico***
Precisión H	8 mm ± 1 ppm	8 mm ± 0,5 ppm	3 mm ± 0,5 ppm	3 mm ± 0,1 ppm	3 mm + 1 ppm	-
Precisión V	15 mm ± 1 ppm	15 mm ± 0,5 ppm	5 mm ± 0,5 ppm	3,5 mm ± 0,4 ppm	5 mm + 1 ppm	± 0,7 mm/km
Precisión distancia	-	-	-	-	2 mm + 2 ppm	-

*Según especificaciones de Geomax Zenith60 o similar

**Según especificaciones de Geomax Zoom95 de 1" o similar, aplicación de Bessel y reducción de esfericidad y refracción en líneas < 500 m.

***Según especificaciones de Geomax ZDL700 o similar

1.4 TIPOLOGÍA DE RESULTADOS

1.4.1 NUBES DE PUNTOS

Es el producto principal y más importante obtenido a partir de las tecnologías LiDAR (láser escáner terrestre, lidar aerotransportado, mobile mapping...) y de la fotogrametría. A partir de ellas podremos generar un sinfín de resultados como mapas ráster y vectoriales, mallas y sólidos, paseos virtuales, etc.

Las nubes de puntos son un conjunto de vértices definidos por sus coordenadas X, Y, Z, que pueden ser locales o globales, pero además, pueden llevar valores de reflectancia, color (R,G,B), etc. todo ello, depende de los sensores que se hayan utilizado en la toma de datos.

1.4.2 MAPAS RASTER

1.4.2.1 Ortofotografías y ortofotoplanos

Una ortofotografía es la representación planimétrica del terreno a partir de un conjunto de imágenes aéreas que han sufrido un proceso fotogramétrico para que este producto final sea medible y esté libre de deformaciones, de manera que tenga el mismo valor que un plano cartográfico. La precisión de este producto lo marca el GSD (Ground Sampling Distance), tamaño de pixel sobre el terreno.

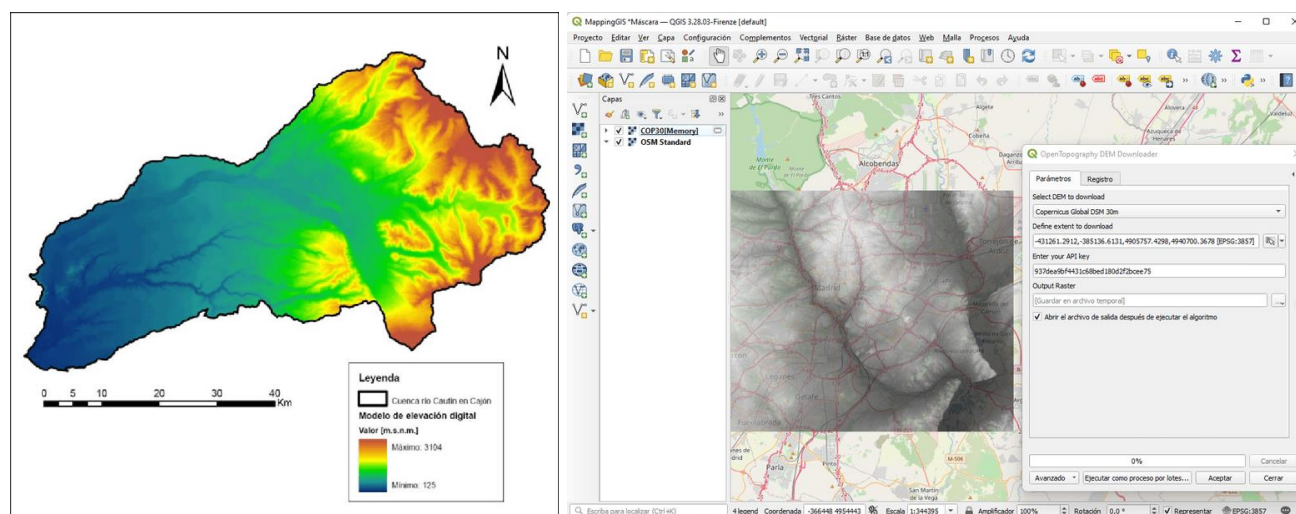


A menudo en el proceso cartográfico, a la ortofotografía se le agrega información altimétrica, una cuadrícula UTM y toponimia, obteniendo un derivado de la ortofotografía llamado ortofotomapa u ortofotoplano.

1.4.2.2 Modelos Digitales de Elevaciones (DEM y GeoTIFF)

Aunque los DEM se pueden representar tanto en formato RASTER (GeoTIFF) como vectorial, de malla o de modelo sólido, es el primero uno de los más habituales para áreas extensas y el más utilizado en procesos cartográficos complejos.

Los modelos digitales de elevaciones son la representación matemática del terreno, que pueden obtenerse a partir de procesos fotogramétricos o mediante tecnologías LIDAR. Si es información RASTER, cada pixel contiene el valor numérico de la altitud del terreno en ese punto.



1.4.3 MAPAS VECTORIALES

Un mapa vectorial es una representación cartográfica digital creada a partir de formas geométricas; es decir, que utiliza ecuaciones matemáticas para componer las formas. A diferencia de las imágenes rasterizadas, que están compuestas por píxeles y pueden perder calidad al ampliarse, las imágenes vectoriales son escalables de forma indefinida sin perder nunca resolución.

De este modo, los mapas vectoriales se crean a partir de objetos geométricos básicos, como líneas, segmentos, curvas, círculos y polígonos, definidos matemáticamente mediante vectores. Estos vectores contienen información sobre posición, dirección, longitud y otros atributos, permitiendo la representación precisa de la forma.

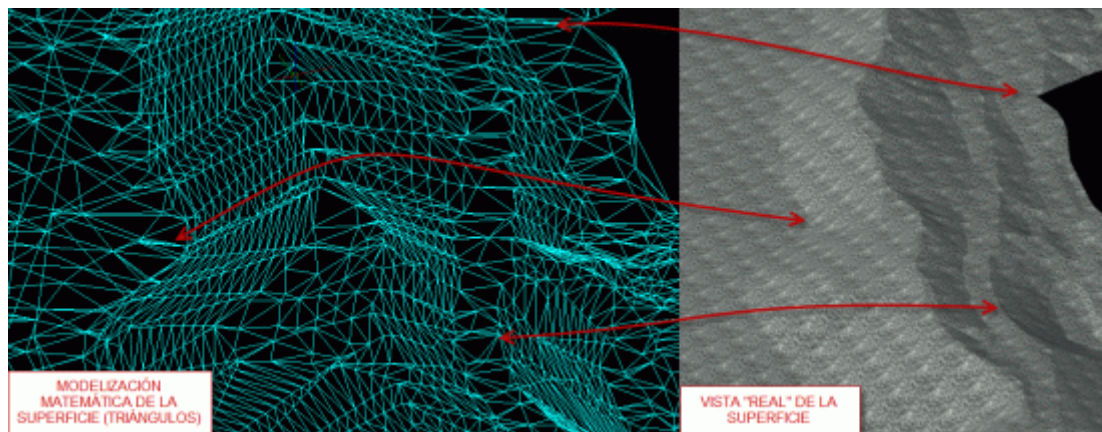
1.4.3.1 Restitución planimétrica

La restitución planimétrica trata de vectorizar las diferentes estructuras existentes en el terreno y sobre el mismo (líneas de rotura, edificios, muros, carreteras, etc.) utilizando como base las ortofotografías. Dependiendo del GSD de estas, obtendremos una precisión u otra en nuestro resultado final, lo cual definirá la escala resultante.

1.4.3.2 Restitución altimétrica

Los mapas vectoriales altimétricos están basados en entidades (básicamente puntos y líneas) definidas por sus coordenadas tridimensionales. Las tres representaciones básicas en la restitución altimétrica son:

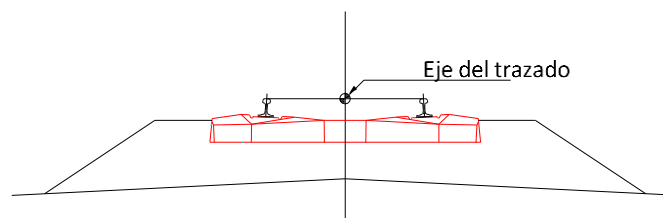
- las curvas de nivel o isohipsas del terreno,
- los perfiles del terreno,
- red de triángulos irregulares (TIN).



1.4.3.3 Desarrollo geométrico y trazado de obras ferroviarias

Para poder definir la geometría de la línea ferroviaria se requiere la elaboración de un modelo tridimensional, que se apoya sobre el modelo digital del terreno. Esta modelización requiere una serie de simplificaciones:

- A. Dado el predominio que en una línea ferroviaria tiene la dimensión longitudinal frente a la dimensión transversal, se adopta la simplificación de definir por separado el trazado longitudinal y el transversal. Para ello, se define un eje de trazado al que se asigna por tramos una sección transversal determinada. El eje de trazado queda ligado a la sección transversal mediante un punto característico de la misma.
- B. Para la definición del eje de trazado, que tiene un carácter tridimensional, se hace la siguiente simplificación:
 - . Estudiar el trazado del eje en planta, prescindiendo de la dimensión vertical, resultando un análisis bidimensional mucho más fácil de abordar.
 - . Asignando cotas a lo largo del recorrido definido por el trazado del eje en planta resulta el trazado en alzado o perfil longitudinal.
- C. Teniendo en cuenta que las pendientes del perfil longitudinal son pequeñas, la diferencia de longitud del eje de trazado frente a la que tiene su proyección en planta es muy pequeña, por lo que se adoptan las siguientes simplificaciones:
 - . Se asigna al eje de trazado la kilometración del eje en planta. La diferencia de longitud del eje de trazado con su proyección en planta se considera despreciable.
 - . Las secciones transversales se disponen en un plano vertical, y no de forma ortogonal al eje de trazado.



Estas simplificaciones llevan a representar de forma independiente el trazado en planta, el perfil longitudinal y la sección transversal. No obstante, para evitar la aparición de efectos indeseados se requiere analizar la interacción entre ellos.

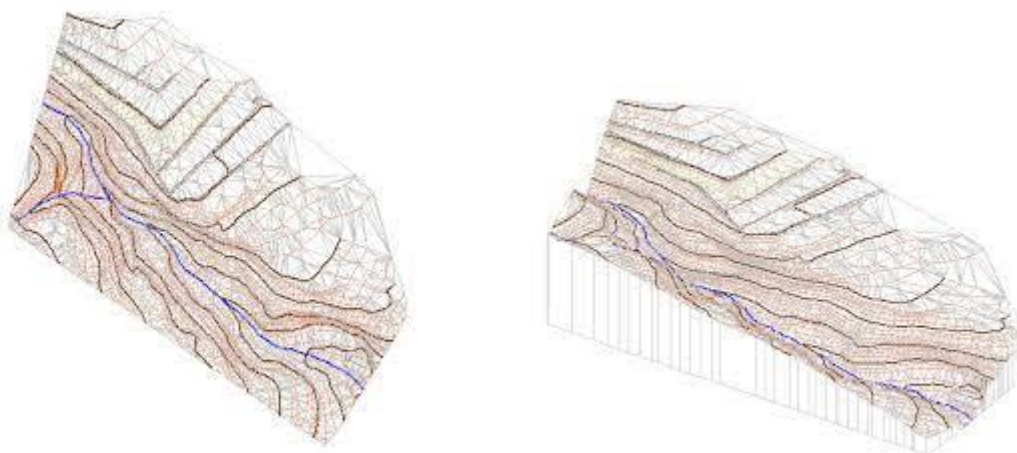
1.4.4 MALLAS Y TRIANGULACIÓN

Son representaciones tridimensionales de envolventes geométricas del terreno o de fracciones del mismo. Existen dos situaciones bien diferenciadas en la representación elementos de infraestructuras de obra civil por medio de una malla o triangulación:

- Cuando se representa una superficie del terreno a cielo abierto: tienen como característica principal su coherencia e integridad en su representación cenital, es decir, no permiten la superposición de triángulos ni de vértices, lo que obliga a que los triángulos permanezcan en un plano desde la horizontal del lugar hasta la vertical del mismo, sin llegar nunca a esta. Esta condición supone la simplificación y eliminación de voladizos, huecos en paredes y superficies subterráneas.
- Cuando se representa un túnel, una infraestructura o elementos artificiales del entorno: en este caso las mallas deben tratarse con software específico que permita el cálculo, la representación y la superposición de triángulos desde cualquier punto de vista. En cualquier caso, la malla debe adquirir coherencia, continuidad e integridad, debiendo evitarse duplicidades y huecos. Este tipo de mallas suelen ser productos intermedios para la consecución de otro tipo de resultados, como pueden ser las secciones transversales o los modelos sólidos basados en NURBS.

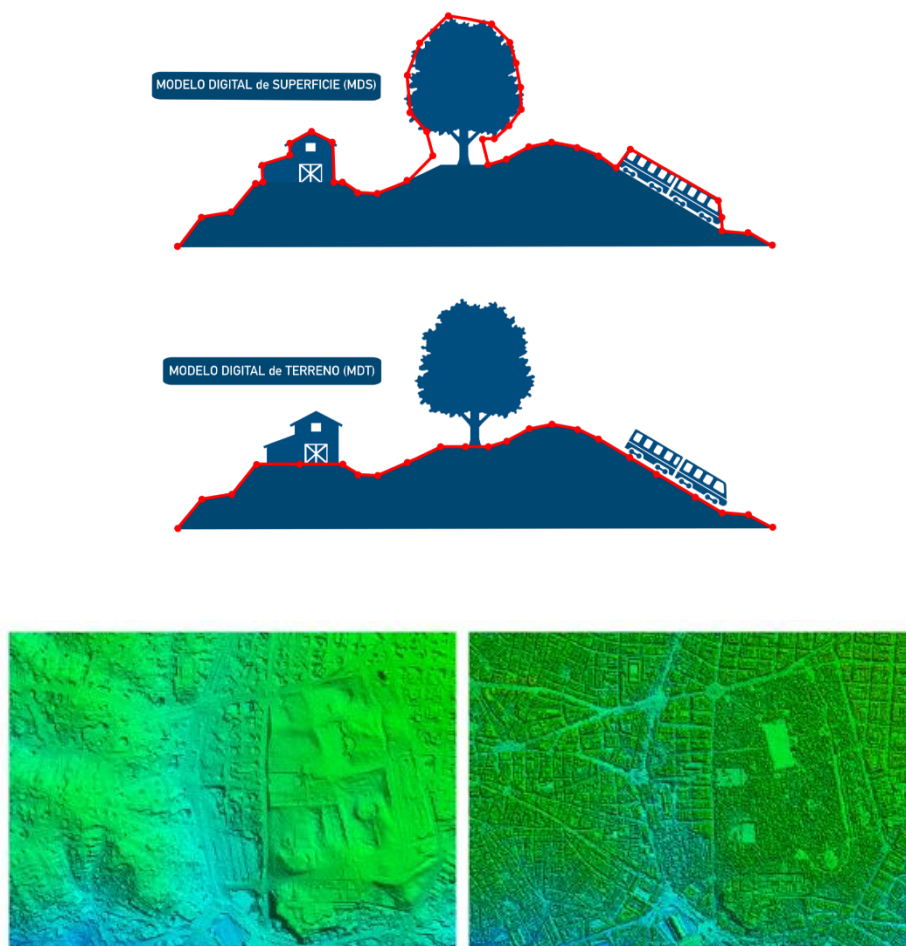
1.4.4.1 Modelos Digitales del Terreno (MDT o TIN)

El Modelo Digital del Terreno es el modelo digital referido al terreno, sin obstáculos como vegetación, acopios, estructuras o edificaciones. En un MDT las aristas de los triángulos que representen líneas de rotura del terreno deben coincidir inequívocamente con las mismas, o al menos con la unión de dos puntos apoyados sobre una misma línea de rotura. A los MDTs también se los denomina TIN (Triangulated Irregular Network).



1.4.4.2 Modelos Digitales de Superficie (MDS)

El Modelo Digital de Superficies es el Modelo Digital con obstáculos, y se representa la superficie más elevada sobre el terreno, sea de origen natural (suelo, vegetación...) o artificial (edificaciones, postes...). En aplicaciones GIS se suele emplear su representación en formato RASTER.



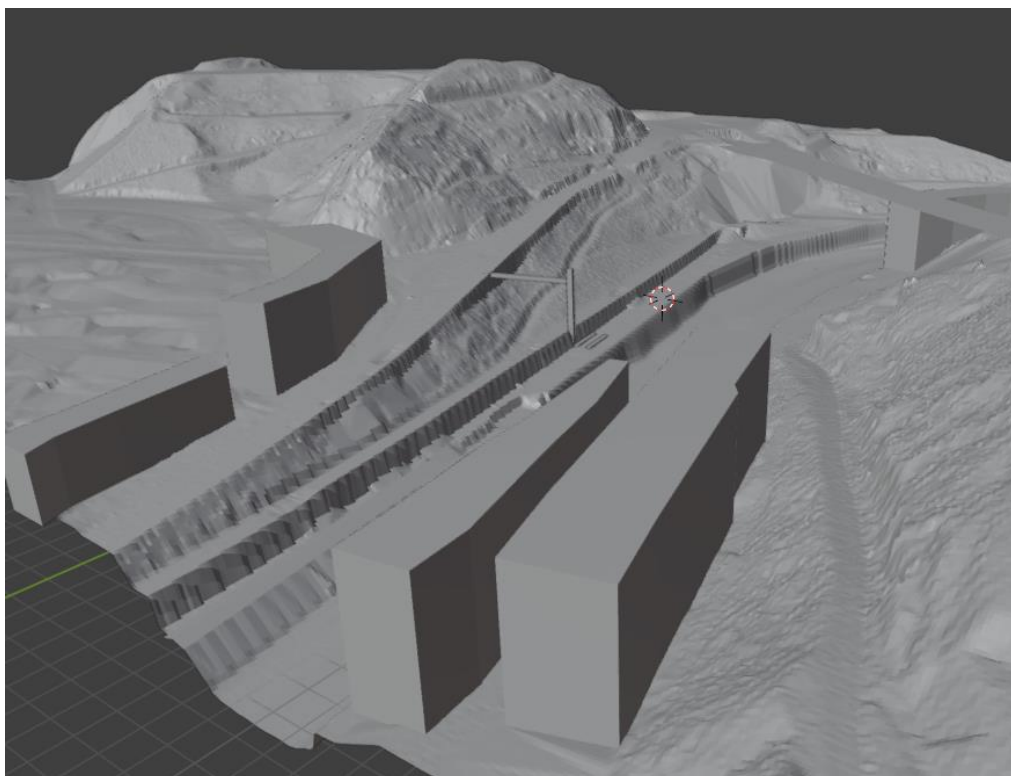
Ejemplo de MDT (izquierda) y MDS (derecha) de la misma zona urbana

Fuente PNOA.ig.es

1.4.5 MODELOS SÓLIDOS

Los modelos sólidos se basan en la construcción tridimensional a partir de su "frontera" (conjunto de superficies que separa el sólido de la parte del espacio no ocupada por él). La frontera se puede ver como la "piel" del sólido. Obviamente cualquier superficie no delimita un sólido. Para que un conjunto de superficies describa un sólido debe satisfacer la siguiente propiedad: el conjunto encierra un volumen, es decir, la piel es cerrada, orientada y completa. Que la piel sea cerrada y esté orientada permite determinar si un punto está dentro o fuera del sólido, y por tanto obtener el modelo topológico.

Pero la mayor ventaja de la utilización de modelos sólidos es la incorporación de parámetros, atributos y enlaces dinámicos con otros modelos, lo que hace de ellos la herramienta más popular en entornos BIM.



1.4.5.1 Modelos sólidos virtuales basados en librerías

Estos modelos se basan en la instanciación de figuras primitivas, compuestos a partir de operaciones booleanas de figuras primitivas, o del barrido de una superficie plana a lo largo de una trayectoria.

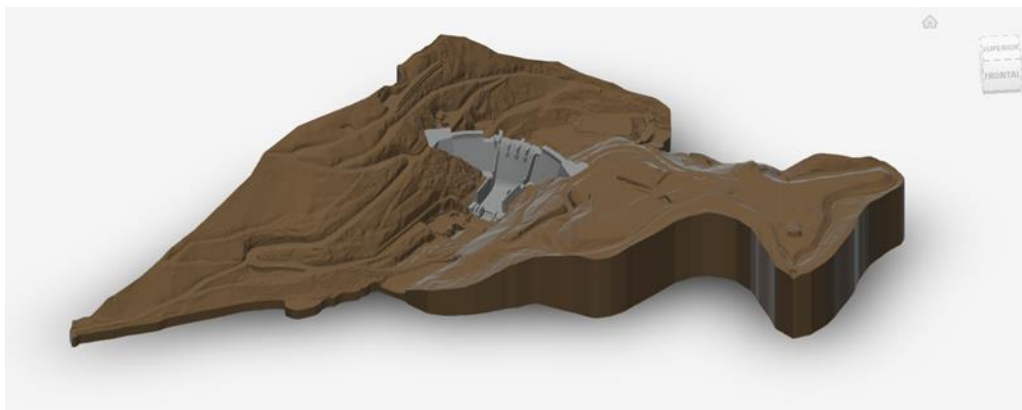
Por su simplicidad y su sencillez en la representación digital, son los modelos más utilizados en entornos BIM, donde la cantidad de elementos y el volumen de información asociada puede ser inmenso.



1.4.5.2 Modelos numéricos basados en NURBs

Las NURBs (Non-Uniform Rational B-Splines) se emplean para construir un modelo geométrico exacto. Estos serían modelos sólidos en tres dimensiones que representan exactamente la geometría. Las NURBs están construidas a partir de B-splines. En definitiva, son modelos geométricos con mucha definición.

La ventaja de los NURBs frente a las mallas o MDTs son muchas, aunque su uso está aún muy limitado y está principalmente desarrollado en aplicaciones de ingeniería inversa.



1.4.6 PASEOS VIRTUALES

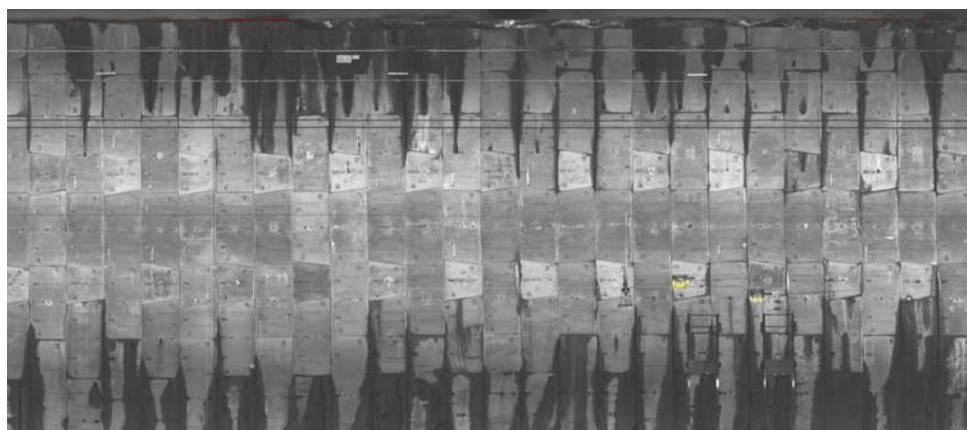
Son recreaciones de la realidad por las que el usuario puede desplazarse e interactuar. Pueden ser reproducidas a partir de imágenes 360, modelos 3D, nubes de puntos, etc. y pueden ser medibles y estar georreferenciados. Sus finalidades pueden ser infinitas, desde marketing hasta inspección de patologías en un túnel.

1.4.7 CANALES DE INSPECCIÓN AUTOMATIZADA EN TÚNELES

Uno de los métodos más eficaces para la inspección automatizada de túneles en explotación es la captura de 3 canales en alta resolución, a partir de los cuales se puedan generar mapeados de patologías y fisuración.

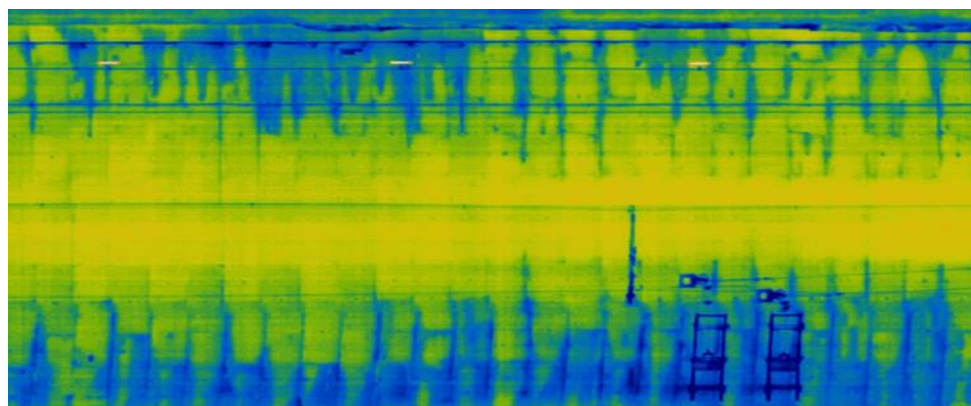
1.4.7.1 Canal visible o imagen albedo

Imagen obtenida a partir de los valores de reflectancias del sistema LIDAR. Es una proyección plana de la sección, perfectamente medible y georreferencia longitudinalmente con el avance de PK (Punto Kilométrico).



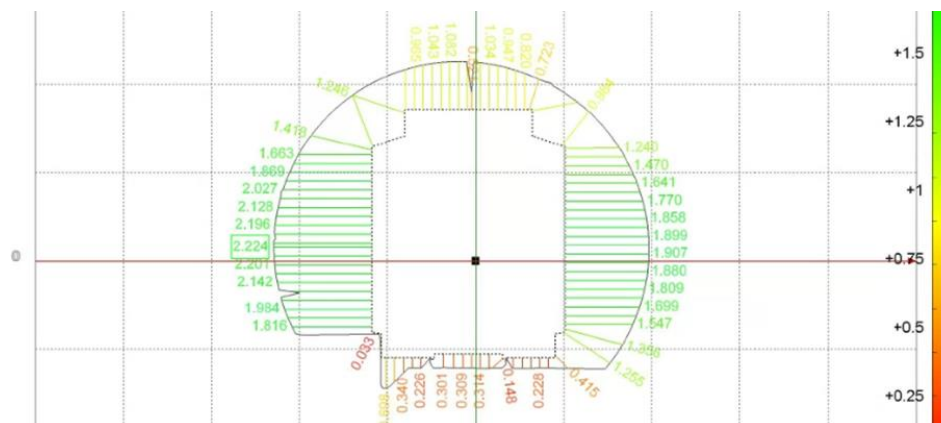
1.4.7.2 Canal infrarrojo o termográfico

Con el equipo de termografía se puede obtener una imagen infrarroja para la detección de zonas húmedas. Esta imagen se representa también como una proyección plana y georreferencia. El canal termográfico es necesario para poder identificar patologías que complementen a las detectadas a través del canal visible, así como para la realización de un análisis termográfico de la superficie del paramento de los túneles. De esta manera, deber permitir el mapeo de humedades, patologías y fisuras.



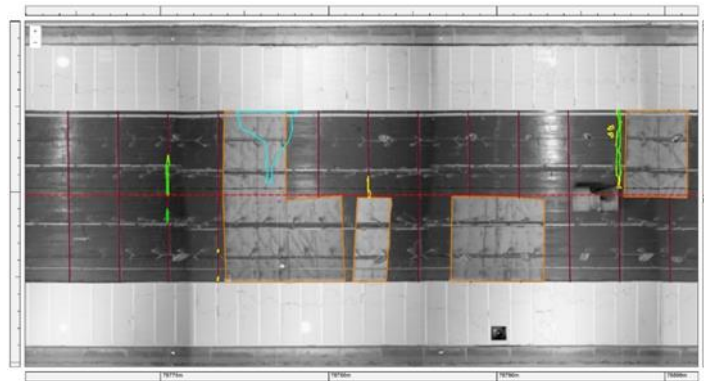
1.4.7.3 Canal 3D o de gálivos

Consiste en la superposición por sección del revestimiento del túnel en bóveda y contra bóveda y del gálibo dinámico del material rodante, con el fin de detectar interferencias.



1.4.7.4 Mapeado de deficiencias y fisuración

Se podría definir como la restitución de patologías y deficiencias del túnel sobre la imagen albedo y el canal termográfico, donde quedan representadas todas las incidencias que pueda tener el túnel en cuestión. Por ejemplo, fisuras, humedades, eflorescencias, etc.



1.4.8 BASES DE DATOS GIS

Son bases de datos asociadas a archivos vectoriales que se pueden conocer también como bases de datos espaciales. El formato por excelencia es el archivo Shapefile, que a su vez consta de varios archivos y cada uno de ellos almacena diferente tipo de información (elementos geométricos, tablas de datos, metadatos, proyecciones, etc.). Principalmente se utilizan para hacer análisis de datos. Al poder trabajar y analizar conjuntamente datos espaciales, datos cuantitativos y cualitativos, hace que estos análisis sean muy potentes.

CAPITULO 2 - REDES GEODÉSICAS Y NIVELACIÓN DE ALTA PRECISIÓN

2.1 INTRODUCCIÓN

La **Red Básica Topográfica** de un proyecto está formada por las bases materializadas en el terreno y observadas mediante uno o varios métodos en función a las características de la red y la finalidad y precisión necesarias. La Red Básica conforma el marco físico sobre el cual se va a asentar el proyecto y debe tener carácter permanente y estable, permanente por su capacidad para durar a lo largo del tiempo sin sufrir alteraciones físicas, y estable por la solidez del terreno en el que se apoyan y por la ausencia de movimientos en su entorno más próximo.

La **Red de Apoyo Topográfico** de un proyecto está formada por los puntos, de diferentes tipologías, que representan elementos diferenciados del terreno sobre los cuales se van a apoyar las diferentes observaciones y capturas masivas de datos. La Red de Apoyo conforma el marco físico que se va a utilizar para la georreferenciación y el control dimensional de una actuación o misión concreta en un momento cualquiera del proyecto, y siempre dependerán a su vez de la Red Básica. Entre los diferentes tipos de puntos que puede haber en una Red de Apoyo, podemos diferenciar:

- **Puntos de Ajuste:** los que se utilizan para georreferenciar una actuación o misión de captura.
- **Puntos de Control:** los que se utilizan para analizar y validar el cálculo realizado con los puntos de Ajuste. Además, servirán para la realización de un control de calidad y de un informe relevante.

Además, los puntos de la Red de Apoyo se pueden diferenciar por su finalidad y precisión, en función a la metodología y tecnología empleada en la captura. Así, podemos ver en el siguiente cuadro los diferentes tipos y sus características:

	Puntos GNSS		Puntos ET	
	Red RTK NTRIP	RTK UHF	Radiación Simple	Radiación Bessel
Fotogrametría Aérea	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
LIDAR Aerotransportado	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
Láser Escáner Terrestre	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Mobile Mapping Exterior	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Mobile Mapping Túnel			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

2.1.1 SISTEMA Y MARCO DE REFERENCIA TOPOGRÁFICO

El sistema de referencia oficial es ETRS89, si bien la materialización del mismo en Euskadi, al igual que en el resto del Estado, es ETRF2000. Esta materialización del marco de referencia se llevó a cabo por el Grupo de Trabajo de la Comisión Especializada del Sistema Geodésico (sub grupo de Cálculo), y se utilizaron observaciones GNSS de estaciones distribuidas por toda la península desde 2011-04-17 a 2017-01-28 (vigencia completa de IGB08). La época de referencia es 2017.0.

Gracias a que la Red Activa está plenamente operativa desde principios de 2006, es posible determinar, con elevada precisión, las velocidades de las estaciones. Por ello, es posible referir el Marco de Referencia a cualquier época.

En los trabajos topográficos convencionales, donde la precisión absoluta no es requisito primordial, se puede partir de coordenadas ETRS89. Sin embargo, en trabajos geodésicos de mayor rigor el marco de trabajo debe ser el mismo en el que vienen dadas las coordenadas de los satélites y al que se refieren los Centros de Fase de las antenas y relojes (IGSxx o sus derivaciones, como IGB08, IGB14, en función del marco vigente) y siempre ligado a la época de observación. La proyección de las soluciones a la época y marco de referencia se realizará utilizando las velocidades medias de las Estaciones Activas del Territorio.

Todos los trabajos de campo, procesamiento, cálculo, compensación y ajuste se efectuarán siempre en el marco materializado por las Estaciones Activas. Para trabajos en que la precisión demandada no sea elevada (escalas 1/1.000 e inferiores), se podrá trabajar directamente en ETRF2000, sin aplicar velocidades a las estaciones. En todos los demás casos, las coordenadas han de ser trasladadas a la época de observación.

El traspaso entre ITRF* y ETRS89 debe efectuarse siguiendo las recomendaciones de la Nota Técnica de Z. Altamimi (<http://etrs89.ensg.ign.fr/pub/EUREF-TN-1.pdf>).

El traspaso entre ETRS89 y ED50 se realizará mediante la transformación de la red a ETRS89 empleando el método de transformación de mínima curvatura desarrollado por el IGN y mediante la última rejilla disponible, u obteniendo los parámetros de transformación, siempre y cuando se justifique su idoneidad.

2.2 RED BÁSICA

La Red Básica Topográfica de un proyecto está formada por las bases materializadas en el terreno y observadas mediante uno o varios métodos en función a las características de la red y la finalidad y precisión necesarias. Conforman el marco físico sobre el cual se va a asentar el proyecto y debe tener carácter permanente y estable, permanente por su capacidad para durar a lo largo del tiempo sin sufrir alteraciones físicas, y estable por la solidez del terreno en el que se apoyan y por la ausencia de movimientos en su entorno más próximo.

2.2.1 RED BÁSICA PRINCIPAL

La Red Básica Principal está constituida por las bases materializadas, observadas y calculadas simultáneamente al inicio del proyecto, y tienen las siguientes características:

- Deben estar distribuidas dentro y alrededor del área de alcance del proyecto.
- Deben estar separadas aproximadamente unos 200 metros entre sí.
- Cada una de ellas debe tener visual directa al menos a otras dos bases de la Red Básica Principal.
- Deben materializarse de modo que permitan el estacionamiento en un trípode topográfico.

2.2.1.1 Observación planimétrica de la Red Básica Principal

En el caso que nos ocupa, proyectos ferroviarios, donde el área de actuación está comprendida a lo largo de una traza o eje y con un ancho de banda definido, debemos prestar especial atención al inicio y al final del trazado, y al inicio y al final de tramos sin cobertura GNSS (túneles y trincheras). Así, podemos diferenciar entre 2 tipos de bases en esta categoría:

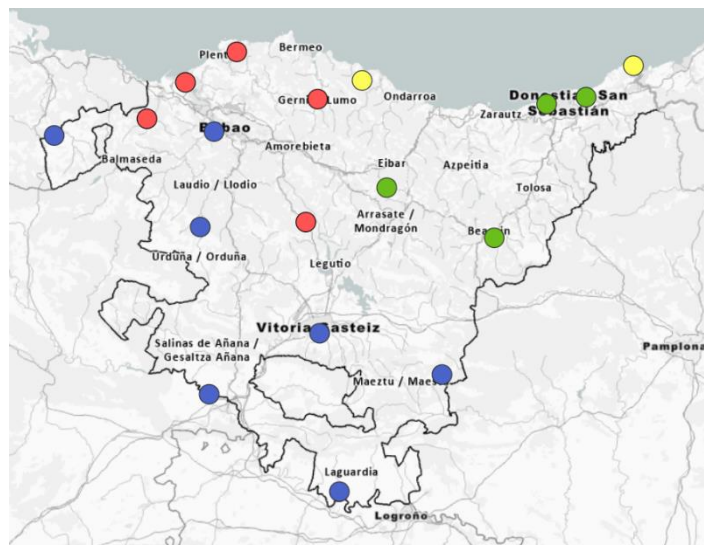
- **Tipo 1:** las que están en exterior y disponen de un buen horizonte de observación GNSS.
- **Tipo 2:** las que están en interior de túneles y trincheras, así como las que no disponen de un buen horizonte de observación GNSS.

Así, al inicio y al final del trazado, y al inicio y al final de tramos de túnel, debemos disponer 2 bases en cada extremo, con las mismas características ya expuestas en el punto anterior y del Tipo 1. Además, deberán tener suficiente horizonte libre como para observar al menos 10 satélites simultáneamente durante todo el tiempo de observación, con una máscara de elevación de 15 grados.

Todas las bases de Tipo 1 se observarán con sistemas GNSS bifrecuencia y multiconstelación por el método estático, utilizando al menos 2 receptores simultáneamente y solapando ventanas de observación de al menos 20 minutos entre bases consecutivas. Para el estacionamiento de cada uno de los receptores se utilizará un sistema de centrado forzoso con trípode y base nivelante. Los tiempos de observación total se calcularán en base a las siguientes premisas:

- En base a la distancia entre receptores los tiempos de observación serán de 15 minutos + 1 minuto por km. En el caso de escalas 1:500 es aconsejable que los tiempos sean de 20 minutos + 2 minutos por km.
- La medición de alturas de antena debe ser lo más cuidadosa posible y se recomienda el empleo de receptores idénticos para evitar errores de constantes de antena. Las excentricidades se medirán como se señala en el apartado de altimetría.
- Se grabarán observaciones GPS, Glonass, Galileo y Beidou con una frecuencia de 1 segundo durante la venta de observación.

Antes de iniciar la observación, se planificarán los tiempos según la longitud de la línea-base a la antena de la red GNSS activa de Euskadi.



Las bases de Tipo 2 se observarán por el método de poligonal o itinerario, siendo ésta orientada, abierta y encuadrada, es decir, partiendo de 2 bases de coordenadas conocidas de Tipo 1 y cerrando en otras dos bases de coordenadas conocidas de Tipo 1. Las condiciones de observación y cálculo serán las siguientes:

- Se aplicará Bessel como norma general, con el fin de minimizar los posibles errores de excentricidad del limbo y de eclímetro.
- Se hará puntería al punto más bajo posible sobre cada base anterior y siguiente de la poligonal, minimizando así el posible error de puntería y de verticalidad del prisma. Si esto no fuera posible, se utilizará un sistema de centrado forzoso con trípode y base nivelante.
- Se utilizará una estación de 1" de precisión angular y sistema de auto colimación, de modo que la puntería sea automática, con el fin de minimizar el error de puntería y la manipulación manual del instrumento.

- Se calcularán las coordenadas de cada estación de la poligonal aplicando el método de ajuste por mínimos cuadrados.
- Se aplicará corrección por esfericidad y refracción, aplicando los siguientes valores:

$$\text{Radio km} = 6378,1$$

$$K \text{ (refracción)} = 0,080$$

- La tolerancia de cierre angular será: $T = e_a \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{n}$, donde:

$$e_a \text{ es el error angular acimutal, } e_a = \sqrt{e_v^2 + e_d^2 + (\sigma\sqrt{2})^2} \cong 30'' \text{ para una estación de } 1''$$

y tramos aproximados de 200 metros de longitud.

$$n \text{ es el número de estaciones de la poligonal}$$

2.2.1.2 Observación altimétrica de la Red Básica Principal

A partir de la red de nivelación de alta precisión NAP de cada una de las provincias, podremos calcular la elevación de cada una de las bases de la Red Básica Principal. El método de observación elegido para esta cuestión es el de nivelación geométrica, empleando el método de nivelación compuesta, encadenando el método de nivelación simple de punto medio.

Se realizará una línea de nivelación sencilla cerrada en anillo para cada kilómetro de recorrido longitudinal, resultando un recorrido total de aproximadamente 2 km. Así, se realizarán recorridos cerrados o anillos de nivelación con esta longitud máxima y su error de cierre deberá cumplir las siguientes ecuaciones:

$$T = e_k \cdot \sqrt{k} ; e_c \leq e_k \cdot \sqrt{k}$$

Donde:

$$T = \text{tolerancia}$$

$$e_k = \text{error del equipo}$$

$$k = \text{longitud de la nivelación en kilómetros}$$

$$e_c = \text{error de cierre}$$

Para trabajos de actuación local, donde el proyecto corresponde a un tramo de obra lineal acotado, y el objeto del mismo es la adecuación, modificación o mejora del trazado, la tolerancia (T) de cada anillo será de ± 10 mm, o lo que es lo mismo, el error de cierre de cada uno de ellos será menor a 10 mm en valor absoluto. Esto corresponde a un $e_k \cong \pm 7 \text{ mm}$.

Para nivelaciones de alta precisión, cuyo fin único es el cálculo de desniveles absolutos entre clavos NAP, y cuyo mantenimiento, cálculo y compensación es competencia de las Diputaciones Forales, la tolerancia (T) deberá cumplir la siguiente ecuación: $T = 1,5 \text{ mm} \cdot \sqrt{k}$, para cualquier longitud de tramo.

El equipo a utilizar deberá ser un nivel digital de precisión $\pm 0,7 \text{ mm/km}$ o mejor, y la lectura deberá realizarse sobre miras de fibra de vidrio con código de barras y resolución de lectura de 0,1 mm.

2.2.2 RED BÁSICA SECUNDARIA

La Red Básica Secundaria está constituida por las bases materializadas y observadas en fases posteriores, según la necesidad de cada momento, y tienen las siguientes características:

- Deben estar distribuidas dentro y alrededor del área de alcance del proyecto.
- Deben estar separadas aproximadamente unos 200 metros entre sí, y a su vez de las bases de la Red Básica Principal.

- Cada una de ellas debe tener visual directa al menos a otras dos bases, sean de la Red Básica Principal o de la Secundaria.
- Deben materializarse de modo que permitan el estacionamiento en un trípode topográfico.

2.2.2.1 Observación planimétrica y altimétrica de la Red Básica Secundaria

Cualquier base de la Red Básica Secundaria se deberá radiar desde una base de la Red Básica Principal, habiendo realizado orientación previa a otra Principal.

El método de observación, para dotar de planimetría a dicha base, será el de radiación directa aplicando el método de Bessel y promediando ambas observaciones. Para la altimetría se calculará el desnivel entre la base Principal y la Secundaria por el método de nivelación trigonométrica.

2.2.3 RED DE APOYO

Tal y como se ha expuesto en la introducción, la Red de Apoyo Topográfico de un proyecto está formada por los puntos que representan elementos diferenciados del terreno sobre los cuales se van a apoyar las diferentes observaciones y capturas masivas de datos. Además, según su finalidad y precisión, se podrán observar por diferentes métodos y la tecnología a utilizar también será diferente, en cada caso.

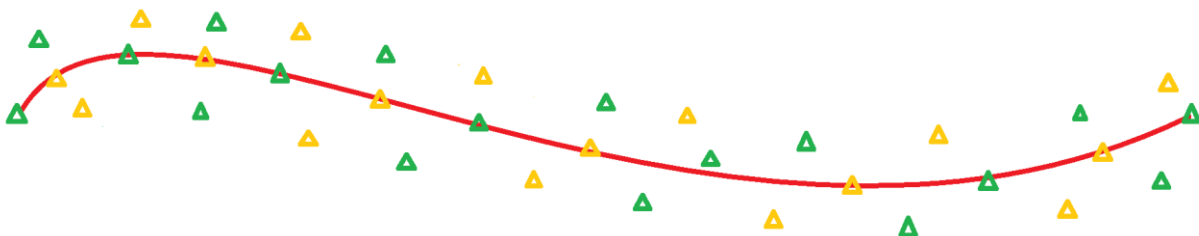
2.2.3.1 Tipología y distribución

También en la introducción de este capítulo de Redes Geodésicas se hace referencia a los diferentes tipos de puntos a utilizar en la Red de Apoyo, a saber:

- Puntos de Ajuste: los que se utilizan para georreferenciar una actuación o misión de captura.
- Puntos de Control: los que se utilizan para analizar y validar el cálculo realizado con los Puntos de Ajuste. Además, servirán para la realización de un control de calidad y de un informe relevante.

La estructura y distribución de estos puntos se realizará en base a las dimensiones y geometría del área de actuación, pero siempre intercalando puntos de Ajuste y puntos de Control entre sí, de modo que podamos analizar el resultado final en todas sus direcciones y áreas de interés.

Así, en un tramo lineal de actuación, los puntos de Ajuste deberán repartirse sobre el eje central del tramo y a ambos lados del mismo, alternando si es posible a tresbolillo, y separados de dicho eje lo máximo posible para una mejor definición altimétrica en los extremos. Del mismo modo, los puntos de Control podrán repartirse entre los anteriores, con una distribución similar. El siguiente gráfico muestra un ejemplo:



Donde los puntos verdes (\triangle) podrían ser los puntos de Ajuste y los naranjas (\triangle) los de Control. Una vez realizada la labor de georreferenciación del bloque mediante el uso de los puntos de Ajuste, se procederá a continuación al análisis de los resultados por medio de dos métodos:

- Análisis de los residuos del cálculo: diferencias entre el bloque georreferenciado y los puntos de Ajuste.
- Análisis de las desviaciones finales: diferencias entre el bloque georreferenciado y los puntos de Control.

2.2.3.2 Puntos GNSS en RTK

La observación de puntos GNSS en RTK se podrá utilizar en proyectos de diferentes tipologías, como los que incluyen:

- Captura con fotogrametría aérea.
- Captura con LIDAR aerotransportado.
- Captura con láser escáner terrestre, en exterior.
- Captura con mobile mapping, en exterior.

El método de observación se elegirá respetando siempre una línea base inferior a 10 km. De este modo, se presentan dos escenarios:

Uso de la Red RTK de las estaciones GNSS activas del territorio histórico:

Cuando una de sus bases está a menos de 10 km de la ubicación central del proyecto. Se realizará una conexión a la red de estaciones GNSS activas utilizando el protocolo NTRIP, formato RTCM y seleccionando el método de correcciones diferenciales de estación más cercana.

Uso del método RTK local con un receptor GNSS propio:

Instalado sobre una base de la Red Básica Principal, cuando las bases de la red de estaciones GNSS activas del territorio histórico están a más de 10 km de la ubicación central del proyecto. Se realizará una conexión vía radio UHF y formato RTCM. Se utilizarán en este caso dos receptores GNSS de las mismas características.

En cualquiera de los dos casos, la observación se realizará bajo las siguientes premisas:

- Se aplicará una máscara de elevación de 15 grados sobre el horizonte.
- Se utilizará un filtro de corte de soluciones con PDOP menor a 3.
- Se realizarán al menos 20 lecturas consecutivas con una latencia de 1 segundo, y se calculará la lectura promediada a nivel de confianza del 99%.
- La precisión del equipo utilizado no excederá los siguientes valores:

Precisión horizontal: 8 mm \pm 1 ppm.

Precisión vertical: 15 mm \pm 1 ppm.

2.2.3.3 Puntos radiados con ET

En algunos proyectos se requiere de precisión adicional a la que aportan los sistemas GNSS RTK, sea en su solución de Red o con correcciones diferenciales vía radio UHF. Así, la georreferenciación pasa por la utilización de métodos topográficos clásicos con estación total de precisión y la observación de los puntos de la Red de Apoyo por el método de radiación directa o aplicando Bessel. En ambos casos se deberá estacionar sobre una base de la Red Básica (Principal o Secundaria).

Algunos ejemplos en la utilización de este método son los siguientes:

- Levantamientos con láser escáner terrestre de alta precisión altimétrica.
- Levantamientos con mobile mapping, tanto en exterior como en túneles y trincheras, donde se requiera alta precisión altimétrica.

Se recomienda el uso del método de radiación aplicando Bessel frente al de radiación simple directa, ya que con su uso se minimiza el error de excentricidad del limbo y de eclímetro, lo que supone una mejora sustancial en la precisión final de los puntos observados. Además, se evitan lecturas fallidas o erróneas debidas a una puntería defectuosa.

CAPITULO 3 - GEOMATICA APLICADA A LAS INFRAESTRUCTURAS FERROVIARIAS

3.1 INTRODUCCIÓN

Este capítulo se ha desarrollado con el fin de determinar los métodos y sistemas más adecuados para el levantamiento topográfico de todos y cada uno de los diferentes sistemas de la red ferroviaria, como son:

Infraestructura ferroviaria

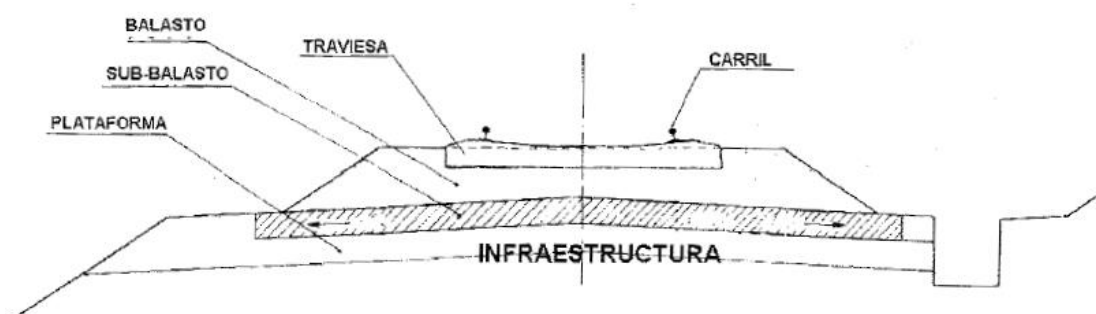
es el conjunto de obras de tierra y de fábrica necesarias para construir la plataforma sobre la que se apoya la superestructura de vía.

- Plataforma
- Puentes y Viaductos
- Terraplenes y trincheras
- Túneles

Superestructura ferroviaria:

es el conjunto integrado por los carriles, contracarriles, las traviesas o, en su caso, la placa, las sujeciones, los aparatos de vía y, en su caso, el lecho elástico formado por el balasto, así como las demás capas de asiento, sobre el que estos elementos apoyan. Se hará especial mención al levantamiento de:

- Carriles
- Balasto y Placa



Por último, resulta necesario determinar también los métodos y sistemas más adecuados para el levantamiento de:

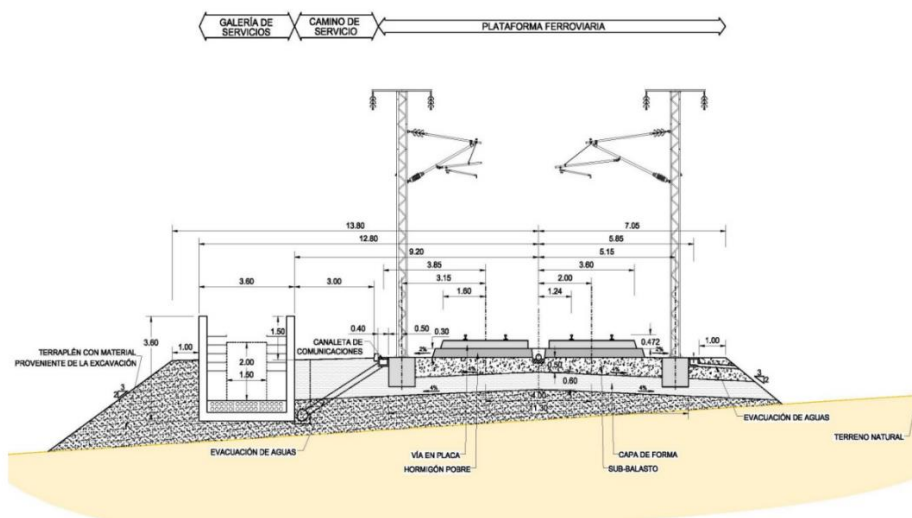
- Instalaciones
- Estaciones y andenes

3.2 LEVANTAMIENTO DE LA PLATAFORMA

3.2.1 PLATAFORMA: DEFINICIÓN E IDENTIFICACIÓN

La plataforma ferroviaria la forman las capas inferiores que confieren continuidad y estabilidad a la superestructura, desde el terreno natural, la superficie de explanación hasta la capa de forma y el sub balasto. Una vez construida, la plataforma aparece como una única estructura de materiales compactos con una sección tipo definida.

Aunque la capa de balasto o de placa, que descansan sobre la plataforma, pertenecen a la superestructura, a menudo son solidarias, pertenecen a una geometría definida por una única sección tipo. Es por ello que, en el momento del levantamiento topográfico, no se discriminan en cuanto a método y sistemas de trabajo se refiere y, excepto por las aristas que las definen, se capturan simultáneamente y con las mismas premisas y tolerancias.



Lo mismo ocurrirá con los servicios anexos, vías de servicio y de comunicación viaria, canales y cunetas de drenaje longitudinal.

Se deberán atender con detalle las obras de drenaje transversal, ya que su configuración depende de estructuras de hormigón bien definidas (arquetas, pozos, colectores y canalizaciones) y su representación ayudará al análisis y cálculo de drenajes. Del mismo modo, se prestará atención a las canalizaciones y arquetas de comunicaciones e instrumentación ya que, aunque dependen de otras disciplinas, forman parte de la sección tipo de la plataforma.

3.2.2 PLATAFORMA: SISTEMAS DE MEDICIÓN Y CAPTURA

Los métodos más utilizados para la medición y captura de la plataforma ferroviaria son los siguientes:

Levantamientos con captura masiva:

- **Fotogrametría aérea:** para grandes áreas con poca o ninguna cobertura arbolada, vegetación baja y terrenos colindantes poco abruptos.
- **LIDAR aerotransportado:** al igual que en el caso anterior, para grandes áreas, pero en este caso con cobertura arbolada media o alta.

- **Mobile Mapping:** para grandes áreas y longitudes de tramo, con poca o ninguna cobertura arbolada, vegetación baja y plataformas estrechas. También en tramos de trinchera y de túnel, donde las aristas de la superficie de explanación están bien definidas y se ven desde la vía.
- **Láser escáner terrestre:** para zonas acotadas donde, por las circunstancias orográficas, de accesibilidad o de legislación aérea no es oportuna una operación de vuelo con dron /UAV; también donde la precisión requerida es mayor (estructuras de metal y de hormigón).

Levantamientos con topografía clásica:

- **Con GPS en RTK:** en zonas acotadas donde la baja vegetación u otras circunstancias hacen inaccesible el terreno a otros sistemas de captura masiva.
- **Con estación total y método de radiación directa:** al igual que en el caso anterior, pero donde además la mala cobertura GPS y el horizonte no ofrecen garantías para un levantamiento en RTK.

Todos estos métodos son complementarios y nunca excluyen uno al otro. De hecho, lo más habitual es utilizar uno o varios sistemas de captura masiva para el levantamiento general de la plataforma y, además, completar los detalles con métodos de topografía clásica.

Esto mismo ocurrirá en los tramos de terraplén y trinchera donde, además de la plataforma, se capturará simultáneamente el entorno topográfico que configura la sección tipo completa hasta el encuentro con el terreno natural, esto es, desde la arista de explanación hasta la cabeza o pie de talud, según sea desmonte o terraplén, respectivamente.

3.2.2.1 Levantamientos con dron /UAV (fotogrametría y LIDAR)

Las fotografías aéreas son el producto básico para la creación de la nube de puntos y ortofotomapas y por lo tanto depende de su calidad y precisión el correcto resultado de todos los sucesivos pasos. Se deberán tener muy en cuenta además las siguientes cuestiones:

- La resolución se expresa en píxeles/cm y representa el tamaño que ocupa cada pixel en la foto realizada. Dependiendo de las necesidades de cada proyecto es posible obtener resoluciones que van desde 1cm/píxel hasta 12cm/píxel. Para ello pueden variar el tipo de lente, resolución de la cámara y altura de vuelo. Por regla general, mayor resolución implica volar más bajo y más lento, lo que exige más tiempo en el aire, lo que a su vez implica realizar más vuelos.
- La calidad de las fotos es fundamental para obtener los píxeles/cm deseados. Se necesita que la foto sea nítida para alcanzar la resolución real de la cámara, pues de lo contrario, en una foto borrosa, movida o de poca resolución, no se podrá identificar con precisión los puntos de control ni realizar de manera eficaz la triangulación de la información. La nitidez significa que la imagen adquirida por el dron es estática, sin movimiento.
- La precisión de un levantamiento topográfico realizado con dron /UAV se basa en la diferencia que puede surgir entre las coordenadas de un punto determinado en el terreno y las coordenadas obtenidas del mismo punto en la reconstrucción tridimensional.
- Por el contrario, sin puntos de control en el suelo, pueden aparecer en la reconstrucción deformaciones, abultamientos o depresiones, e incluso inclinación en todo el terreno. En un mal proceso pueden aparecer diferencias de hasta 3 metros en los ejes XY (latitud y longitud de los puntos geográficos) y hasta 30m en Z (altitud) Este tipo de errores se solucionan al contar con puntos de control con coordenadas conocidas. De esta manera es posible enlazar y acomodar el levantamiento aéreo con los puntos de control en el suelo (GCP). Los puntos de control se ubican y marcan con métodos tradicionales topográficos empleando estaciones totales robóticas, sistemas GPS RTK, etc, y deben estar enlazadas a la red geodésica. Cuantos más puntos se tengan y mejor distribuidos estén sobre el terreno, más preciso será el resultado final. La distribución y densidad de los GCP la determina el especialista fotogramétrico en base al terreno que vaya a reconstruir y las características de la cámara y altitud de vuelo.

A continuación, se presenta aproximadamente la relación calidad / resolución en función a las características del vuelo y de los puntos de control y su distribución, así como las escalas de trabajo en cada caso, para la definición de la plataforma de vía:

	Fotogrametría aérea				LIDAR aerotransportado			
	AGL 80 m. Solape L/T 70%/80%	AGL 80 m. Solape L/T 80%/90%	AGL 120 m. Solape L/T 70%/80%	AGL 120 m. Solape L/T 80%/90%	AGL 60 m. Solape T 85%	AGL 80 m. Solape T 80%	AGL 100 m. Solape T 75%	AGL 120 m. Solape T 70%
GSD - tamaño de pixel	2,5 cm.	2,0 cm.	3,0 cm.	2,5 cm.	-	-	-	-
Precisión Horizontal	5 cm.	4 cm.	6 cm.	5 cm.	1,5 cm.	2,0 cm.	2,5 cm.	3,0 cm.
Precisión Vertical	7,5 cm.	6 cm.	9 cm.	7,5 cm.	2 cm.	3 cm.	4 cm.	4,5 cm.
Resolución Nube de Puntos (ptos/m3)	≈300	≈400	≈100	≈200	-	-	-	-
Resolución Nube de Puntos (ptos/m2)	-	-	-	-	≈3000	≈2500	≈2000	≈1500
Escala de trabajo	1/500	1/200	1/1000	1/500	1/200	1/200	1/500	1/500
Int. mínimo entre curvas de nivel	25 cm.	10 cm.	50 cm.	25 cm.	10 cm.	10 cm.	25 cm.	25 cm.
Puntos de Control por Ha.*	≈0,5	≈0,4	≈0,3	≈0,2	≈0,4	≈0,3	≈0,2	≈0,1

*Calculado para un mínimo de 50 Has. Al menos 5 puntos de control por proyecto.

Esta tabla no es de estricto cumplimiento y las condiciones del levantamiento se deberán establecer para cada caso, pero puede servir de base para la definición de las características generales del proyecto.

3.2.2.2 Levantamientos con Mobile Mapping

En los levantamientos con Mobile Mapping se deberán tener en cuenta las siguientes premisas:

- Resolución LIDAR: 1.000.000 puntos/segundo y al menos 260 Hz.
- Rango de distancia: al menos 180 metros.
- Precisión absoluta de la nube de puntos: mejor que 10 cm.
- Aplicación de color: si, en alta resolución.
- Fotogramas equirectangulares de 360° con resolución mínima de 25Mpx.
- Formato de entrega estándar de nubes de puntos: LAZ, LAS, E57 o similar.
- Subsistema de navegación y posicionamiento: multiconstelación (GPS, Glonass, Galileo, Beidou) y cálculo preciso en PPK (postproceso en cinemático). Se utilizará una base de referencia GNSS de la Red Activa de EUSKADI cada 20 km aproximadamente. En caso de pérdida de precisión por aumento de la línea-base se ubicará una estación base propia entre 2 bases de referencia GNSS de la Red Activa de EUSKADI.

	Velocidad 10 km/h		Velocidad 40 km/h		Velocidad 80 km/h	
	Distancia 10 m.	Distancia 30 m.	Distancia 10 m.	Distancia 30 m.	Distancia 10 m.	Distancia 30 m.
Resolución Nube de Puntos a 1 Mp/sg y 260 Hz (ptos/m2)	≈6600	≈2100	≈1500	≈500	≈800	≈250
Resolución Nube de Puntos (tamaño pixel)	1,2 cm	2,2 cm	2,6 cm	4,5 cm	3,5 cm	6,5 cm
Precisión Horizontal	2,5 cm		5,0 cm		7,0 cm	
Precisión Vertical	4,0 cm		8,0 cm		12,0 cm	
Escala de trabajo	1/200		1/500		1/500	
Intervalo mínimo entre curvas de nivel	10 cm.		25 cm.		25 cm.	
Puntos de Control por km.	≈1		≈0,5		≈0,25	

Además de estas especificaciones, se deberían tener en cuenta las siguientes cuestiones:

- La trayectoria de escaneo se planificará de manera eficiente para garantizar que la captura de la vía cubra todo el corredor ferroviario sin áreas de sombra significativas, donde la visibilidad del LiDAR pueda verse bloqueada por obstáculos como andenes, trenes en movimiento o estacionados, o vías adyacentes.
- Todo elemento en movimiento en la zona de vías como trenes, personas o cualquier otro elemento que haya sido escaneado pero que no pertenezca a la infraestructura será identificado y excluido de la nube de puntos antes de la entrega. La nube de puntos quedará limpia de imperfecciones y puntos aislados que puedan resultar de los trabajos de escaneo.
- El plan de escaneo se debe presentar para aprobación para minimizar las posibles afecciones en las operaciones del tren y garantizar que la vía esté despejada durante el escaneo.
- El vehículo de escaneo operará a una velocidad que garantice la densidad de puntos requerida y la precisión de los datos. La velocidad deberá ser consistente con las consideraciones de seguridad del proyecto y regulaciones.
- El sistema LiDAR se calibrará antes del inicio del estudio y a intervalos regulares durante y después del estudio para garantizar la precisión y calidad de los datos. Los informes de calibración serán revisados y aprobados por un profesional calificado antes de que comience el estudio. Se mantendrá y divulgará un registro de los resultados, informes y certificados de la calibración.

3.2.2.3 Levantamientos con láser escáner terrestre

Para la captura de datos con láser escáner y su posterior registro en coordenadas relativas se podrán utilizar esferas de alta reflectancia ubicadas en las zonas de solape entre escaneos, de modo que permitan un encaje preciso entre ellos de cara a una georreferenciación posterior sólida.

Se configurará el equipo laser escáner a una resolución media y se capturarán escaneos de forma consecutiva a lo largo de la trayectoria, alternando a ambos lados de la plataforma, siempre con el fin de solapar escaneos y minimizar las zonas de sombra.

El procesamiento de toda esta información requiere de un exhaustivo conocimiento del método y de rigor en la aplicación del mismo, de cara a optimizar tiempos y resultados. A continuación, se describen las principales fases de cara a la obtención de una nube de puntos densa consolidada, coherente y precisa, sobre la cual trabajar para la generación de planos y modelos 3D:

Filtrado de los escaneos

El primer paso en gabinete, y una vez realizada la comprobación del conjunto con un registro nube a nube previo en campo, es cargar por completo todos y cada uno de los escaneos y aplicar diferentes filtros para la optimización de la nube:

- Filtro por valores de reflectancia (puntos oscuros)
- Filtro de puntos dispersos
- Filtro por distancia
- Filtro de suavizado
- Filtro de color

Registro de los escaneos en coordenadas relativas

A continuación, se procederá a la unión precisa y consolidada de los diferentes escaneos entre sí en un solo bloque, que tendrá carácter local y relativo.

El registro nube a nube permite la obtención de encajes muy precisos en el orden del milímetro. Para ello es necesario realizar agrupamientos de escaneos que contengan zonas comunes y donde el solape sea evidente.

Cada agrupamiento se registrará por separado y se analizarán las posibles desviaciones de cada uno, realizando subagrupamientos cuando sea necesario hasta que cada registro independiente sea preciso y coherente. Una vez completados los agrupamientos por separado se procederá a la unión completa del bloque, también con el método de registro nube a nube.

Para la comprobación y control de la calidad de la unión del bloque se utilizarán elementos estructurales más complejos (planos, losas, cilindros) o referencias artificiales (esferas o dianas) que, identificados desde varios escaneos y comparados entre sí en posición y dimensiones, nos permitan analizar los residuos finales del registro y validar el proceso siempre que estos residuos estén por debajo de la tolerancia.

Aplicación de color y compensación de la nube

El siguiente paso para la generación de un resultado de calidad es la aplicación de color. En esta fase se dará a cada punto un valor RGB, correspondiente al del pixel del fotograma ubicado en la misma dirección sobre la panorámica.

Es fundamental la compensación de color entre escaneos, ya que una misma superficie se puede percibir con dos gamas de color diferentes desde dos ubicaciones diferentes. La exposición de cada fotograma tampoco será igual a la del siguiente, con lo cual la cantidad de color y contraste tampoco lo será. La compensación producirá un suavizado y fusionado de las gamas entre escaneos antiguos.

Registro del bloque en coordenadas locales

Para la referenciación recurriremos a los puntos materializados sobre el terreno a lo largo del túnel y observados con tecnología topográfica centimétrica. Identificaremos estos puntos sobre el bloque generado y realizaremos una transformación del sistema de coordenadas, convirtiéndolo en un elemento perfectamente encajado en el sistema topográfico local (sistema de coordenadas locales).

A continuación, se presenta aproximadamente la relación calidad / resolución en función a las características del levantamiento y de los puntos de control y su distribución, así como las escalas de trabajo en cada caso:

	Interiores: distancias menores de 5 m.	Interiores: distancias menores de 15 m.	Exteriores: distancias menores de 25 m.	Exteriores: distancias menores de 50 m.
Precisión Relativa Horizontal / Vertical	± 1 mm.	± 2 mm.	± 5 mm.	± 10 mm.
Resolución Nube de Puntos (distancia entre puntos)	± 3 mm.	± 5 mm.	± 10 mm.	± 15 mm.
Escala de trabajo	1/100	1/200	1/200	1/500
Int. mínimo entre curvas de nivel	5 cm.	10 cm.	10 cm.	25 cm.

3.2.3 PLATAFORMA: REPRESENTACIÓN

Una vez realizado el levantamiento y el procesado de la información, las fases de trabajo en gabinete serán las siguientes:

- Restitución de líneas de rotura: se vectorizarán las aristas que configuran la sección tipo de la plataforma, desde la más interior (unión con la capa de balasto o de placa), hasta la más lejana al eje (arista de explanación). Aunque en el levantamiento se capturarán datos suficientes a lo ancho de traza como para representar el terreno colindante, zonas de servidumbre y aristas de terraplén y desmonte, no se acometerán en esta fase.
- Delineación: todo aquel elemento susceptible de representación a la escala requerida se delineará según los protocolos y características requeridas. A este grupo pertenecen las obras de fábrica, canalizaciones, arquetas, estructuras, muros, bordillos, pozos, cimentaciones, drenajes, edificaciones, casetas, y cualquier otro elemento representable en planos topográficos.
- Generación del MDT: a partir de los puntos del terreno clasificados y de las líneas de rotura se generará el MDT utilizando métodos de triangulación y aplicando las reglas básicas para la definición de superficies topográficas.
- Composición de planos: según los criterios definidos en el proceso cartográfico y los requerimientos del proyecto, se procederá a la generación de planos, que incluyen, entre otros elementos:

Planimetría: delineación por capas y representación geométrica según escala.

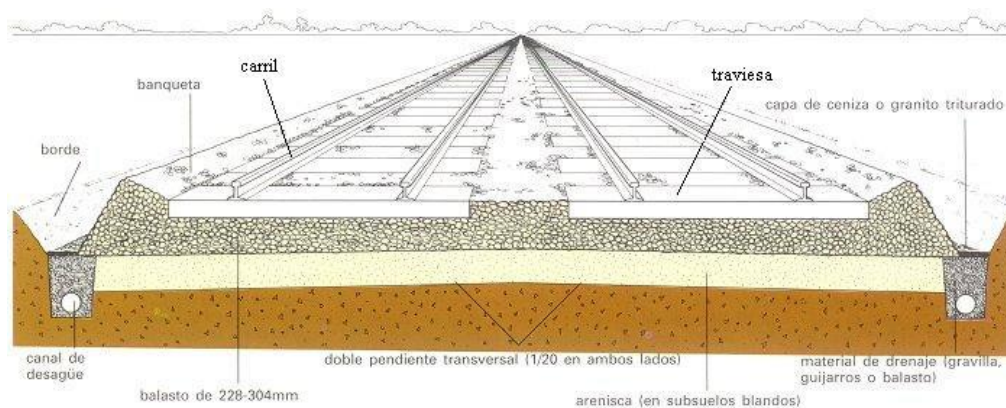
Altimetría: curvas de nivel y puntos de cota.

Toponimia: nomenclatura de municipios, barrios, áreas y pedanías, así como la definición de ríos, cauces, arroyos, cimas y divisorias.

Parcelario: en caso de que el proyecto lo requiera, se podrá representar la estructura de superficies que configuran la distribución parcelaria y/o catastral del área de interés.

- Secciones transversales: a partir de la definición del eje de trazado y del intervalo requerido, se podrán representar las secciones transversales de la plataforma, que deberán incluir todos los quiebros definidos por las aristas del perfil.

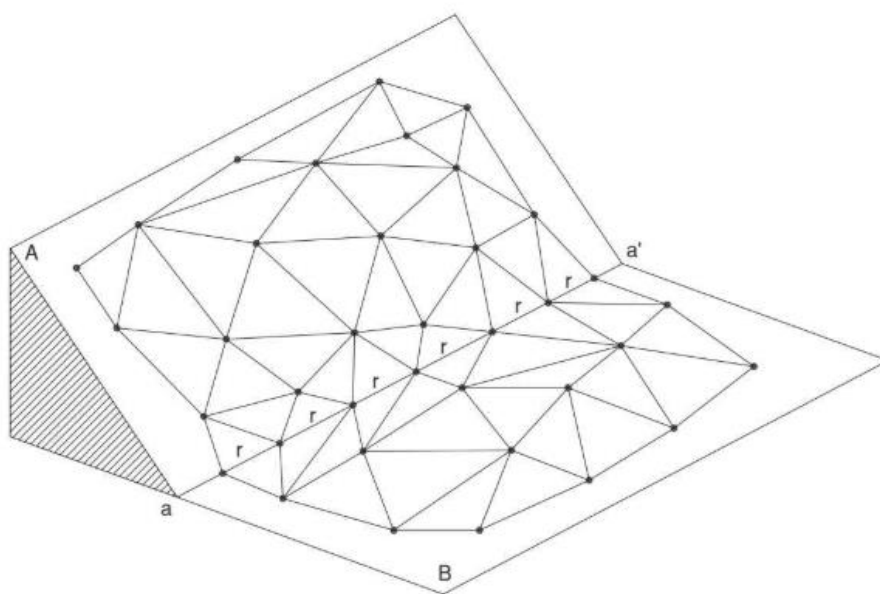
Tal y como se ha descrito en el punto anterior, es lógico pensar que estos procesos deben repetirse y extenderse al ámbito del ancho de traza total a representar, desde la plataforma hacia el exterior, incluyendo las zonas de desmonte y terraplén hasta el encuentro con el terreno natural, e incluso más allá si el proyecto lo requiere.



3.2.3.1 Líneas de rotura

Todas las aristas y cambios de pendiente que configuren la sección tipo representan la geometría de la plataforma. Por ello es primordial seguir las siguientes reglas en la restitución de las mismas:

- Una línea de rotura es una polilínea con definición tridimensional.
- Todos los vértices de una línea de rotura deben apoyarse en puntos capturados sobre el terreno, sea por métodos clásicos o sobre la nube de puntos.
- Una línea de rotura debe ser continua y representar una arista del terreno.
- Dos líneas de rotura no deben cruzarse, pero pueden unirse en uno o varios de sus vértices no consecutivos.
- Cada línea de rotura debe pertenecer al nivel o capa correspondiente, a saber: cabeza de talud, pie de talud, arcén, borde de plataforma, fondo de cuneta, bordillo, muro...
- Las líneas de rotura deben pertenecer al MDT, así como sus triángulos deben apoyarse en las líneas de rotura, de modo que nunca, ningún lado de los triángulos que conforman el MDT puede cortar a una línea de rotura.



3.2.3.2 Restitución planimétrica

La restitución planimétrica refleja todos los detalles identificables, en su exacta posición y verdadera forma con dimensión mínima de 0,2 mm (límite de percepción visual) multiplicado por la escala de salida gráfica, siendo objeto de representación mediante un símbolo convencional normalizado los restantes elementos que por su tamaño no son susceptibles de representar en verdadera magnitud.

Estos son los parámetros para la representación planimétrica y altimétrica en función a la escala del proyecto:

	Escala 1:100	Escala 1:200	Escala 1:500	Escala 1:1000	Escala 1:2000	Escala 1:5000
Dimensión mínima a representar (0,2 mm x escala) (cm)	2 cm	4 cm	10 cm	20 cm	40 cm	100 cm
Elementos a representar mediante símbolos convencionales (cm)	< 2 cm	< 4 cm	< 10 cm	< 20 cm	< 40 cm	< 100 cm
Equidistancia entre curvas de nivel (m)	0,1 m	0,2 m	0,5 m	1 m	2 m	5 m

3.2.3.3 Modelo Digital del Terreno

Para la generación del MDT se deben tener en cuenta algunos aspectos, como la escala y la tipología del terreno. También el levantamiento deberá ser diferente en base a estas características, y de su correcto procesamiento dependerá que los resultados consigan las tolerancias exigidas.

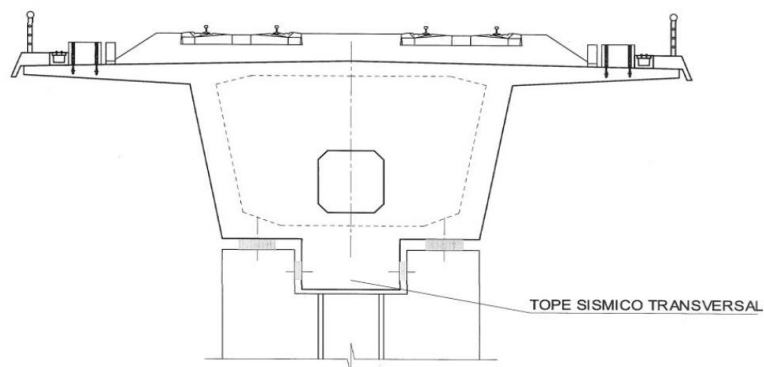
A continuación, se facilita un gráfico con la distribución de escalas, precisiones y resoluciones del MDT o DEM en función a los requisitos del proyecto:

	Escala 1:100	Escala 1:200	Escala 1:500	Escala 1:1000	Escala 1:2000	Escala 1:5000
Equidistancia entre curvas de nivel (m)	0,1 m	0,2 m	0,5 m	1 m	2 m	5 m
Precisión de la superficie (cm)	2 cm	4 cm	10 cm	20 cm	40 cm	100 cm
Superficie MDT o TIN - dimens. de los lados de los triángulos (m)	0,1<L<1	0,2<L<2	0,5<L<5	1<L<10	2<L<20	5<L<50
Superficie DEM o GeoTiff - dimens. de la malla / tamaño de pixel (m)	0,05x0,05	0,1x0,1	0,25x0,25	0,5x0,5	1x1	2,5x2,5

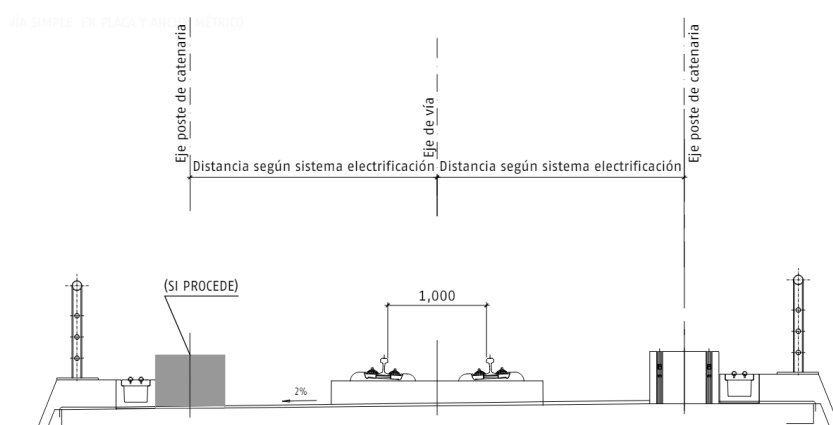
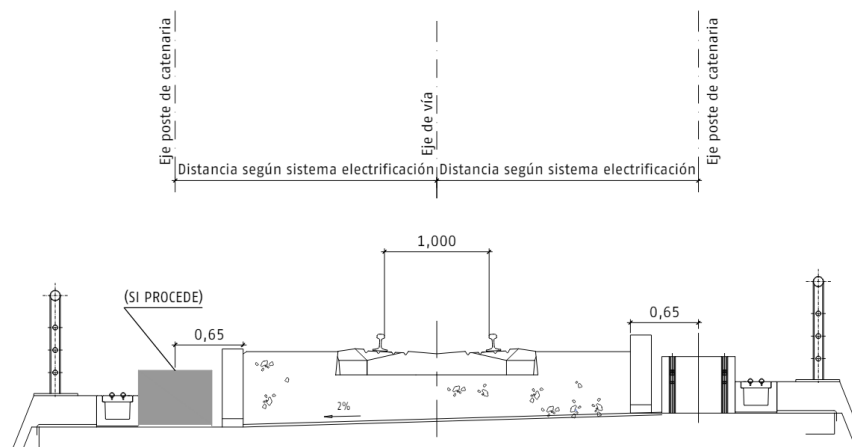
3.3 LEVANTAMIENTO ESTRUCTURAS

3.3.1 VIADUCTOS: DEFINICIÓN E IDENTIFICACIÓN

Los puentes y viaductos tienen una estructura y sección bien diferenciada respecto al resto de tramos a cielo abierto y túneles. Lógicamente, su propósito es el de salvar un valle o depresión topográfica y dar continuidad planimétrica y sobre todo altimétrica al trazado ferroviario. Por eso mismo, su constitución se basa en la cimentación de pilas y estribos y la construcción de un tablero superior sobre el cual se construye la superestructura.



En función a la solución elegida podremos tener balasto y traviesas o vía en placa, pero en ambos casos tendrán una solución constructiva sobre el tablero del puente o viaducto:



3.3.2 VIADUCTOS: SISTEMAS DE MEDICIÓN Y CAPTURA

Al igual que en la plataforma ferroviaria a cielo abierto, la infraestructura de los puentes y viaductos tiene una configuración determinada sobre el tablero, pero también resulta necesario el levantamiento de la estructura por debajo del tablero, es decir, el conjunto de elementos que configuran la cimentación y el sostenimiento del viaducto: pilas y estribos, así como el terreno sobre el cual descansan.

Así, podemos diferenciar los siguientes métodos de medición y captura para las siguientes partes de puentes y viaductos:

Levantamiento sobre el tablero:

- Fotogrametría aérea.
- Mobile Mapping.
- Láser escáner terrestre.
- Topografía Clásica.

Levantamiento de pilas y estribos, así como de la parte inferior del tablero:

- Fotogrametría aérea y LIDAR aerotransportado.
- Láser escáner terrestre.
- Topografía clásica.

En cualquiera de los casos son métodos compatibles y complementarios, siendo necesaria la aplicación de control topográfico con GCPs tal y como se contempla en el capítulo 2.

Se pueden aplicar los mismos parámetros descritos para la plataforma, en el punto 2.2.1 para levantamientos con fotogrametría y LIDAR aéreo, en el 2.2.2. para levantamientos con Mobile Mapping y en el punto 2.2.3. para levantamientos con láser escáner terrestre.

3.3.3 VIADUCTOS: REPRESENTACIÓN

La representación de puentes y viaductos requiere de un especial cuidado y atención a la definición geométrica de la estructura. Así, las fases, similares a las de la restitución de la plataforma, se diferencian de estas tanto en el detalle altimétrico como en la escala a la que se podrá trabajar.

- Restitución de líneas de rotura: se vectorizarán las aristas que configuran la sección tipo, desde la más interior (unión con la capa de balasto o de placa, según proceda) hasta la más exterior del borde del tablero. Se incluirán los muros o bordillos que contengan las diferentes capas (sub balasto, balasto...) y las aristas que configuren los diferentes quiebros de la sección transversal del tablero. También se restituirá la topografía del terreno inferior, entre vanos y sobre el cual descansan pilas y estribos.
- Delineación: se representarán todos aquellos elementos a la escala requerida: obras de fábrica, canalizaciones, arquetas, muros, bordillos, casetas, cimentaciones de postes de catenaria, señalización vertical... También se delinearán los elementos que definen el terreno inferior y que existan sobre él: cauces y ríos, taludes y terraplenes, carreteras y caminos, casetas y edificios...
- Generación del MDT: se podrán generar dos MDTs diferenciados y superpuestos:
 - MDT sobre el tablero.
 - MDT del terreno bajo el tablero del puente o viaducto.
- Alzados del puente o viaducto: a ambos lados del mismo (aguas arriba y aguas abajo) se generarán alzados a la escala requerida que representen todo el detalle de la infraestructura, incluyendo el terreno.

- Composición de planos: según los criterios definidos en el proceso cartográfico y los requerimientos del proyecto, se procederá a la generación de planos, que incluyen, entre otros elementos:
 - Planimetría:** delineación por capas y representación geométrica según escala.
 - Altimetría:** curvas de nivel y puntos de cota.
 - Toponimia:** nomenclatura de municipios, barrios, áreas y pedanías, así como la definición de ríos, cauces, arroyos, cimas y divisorias.
 - Parcelario:** en caso de que el proyecto lo requiera, se podrá representar la estructura de superficies que configuran la distribución parcelaria y/o catastral del área de interés.
- Secciones transversales: a partir de la definición del eje de trazado y del intervalo requerido, se podrán representar las secciones transversales de la estructura, que deberán incluir todos los quiebros definidos por las aristas del perfil, e incluso la representación del tablero completo (superior e inferior).

3.4 LEVANTAMIENTO DE TERRAPLENES Y TRINCHERAS

3.4.1 TERRAPLENES Y TRINCHERAS: SISTEMAS DE MEDICIÓN Y CAPTURA

Al igual que en la plataforma ferroviaria, los sistemas de medición y captura van a depender de la orografía del terreno y de la cantidad de vegetación y cobertura arbolada del área de actuación. Así, podemos diferenciar los siguientes:

Levantamientos con captura masiva:

- **Fotogrametría aérea:** para grandes áreas con poca o ninguna cobertura arbolada, vegetación baja y terrenos colindantes poco abruptos.
- **LIDAR aerotransportado:** al igual que en el caso anterior, para grandes áreas, pero en este caso con cobertura arbolada media o alta.
- **Mobile Mapping:** para grandes áreas y longitudes de tramo, con poca o ninguna cobertura arbolada, vegetación baja y plataformas estrechas. También en tramos de trinchera y de túnel, donde las aristas de la superficie de explanación están bien definidas y se ven desde la vía.
- **Láser escáner terrestre:** para zonas acotadas donde, por las circunstancias orográficas, de accesibilidad o de legislación aérea no es oportuna una operación de vuelo con dron /UAV; también donde la precisión requerida es mayor (estructuras de metal y de hormigón).

Levantamientos con topografía clásica:

- **Con GPS en RTK:** en zonas acotadas donde la baja vegetación u otras circunstancias hacen inaccesible el terreno a otros sistemas de captura masiva.
- **Con estación total y método de radiación directa:** al igual que en el caso anterior, pero donde además la mala cobertura GPS y el horizonte no ofrecen garantías para un levantamiento en RTK.

También al igual que en el caso de la plataforma, los métodos dependerán de la precisión requerida en el proyecto y en cualquier caso son complementarios entre sí, utilizando a menudo uno o varios sistemas de captura masiva para el levantamiento general del área de interés y, además, completar los detalles con métodos de topografía clásica.

Se pueden aplicar los mismos parámetros descritos para la plataforma y los viaductos, en el punto 2.2.1 para levantamientos con fotogrametría y LIDAR aéreo, en el 2.2.2. para levantamientos con Mobile Mapping y en el punto 2.2.3. para levantamientos con láser escáner terrestre.



3.4.2 TERRAPLENES Y TRINCHERAS: REPRESENTACIÓN

En este caso, como ya se ha expuesto en el [punto 3.2.3. Plataforma: Representación](#), se repetirán las mismas fases que en el caso de la representación de la plataforma:

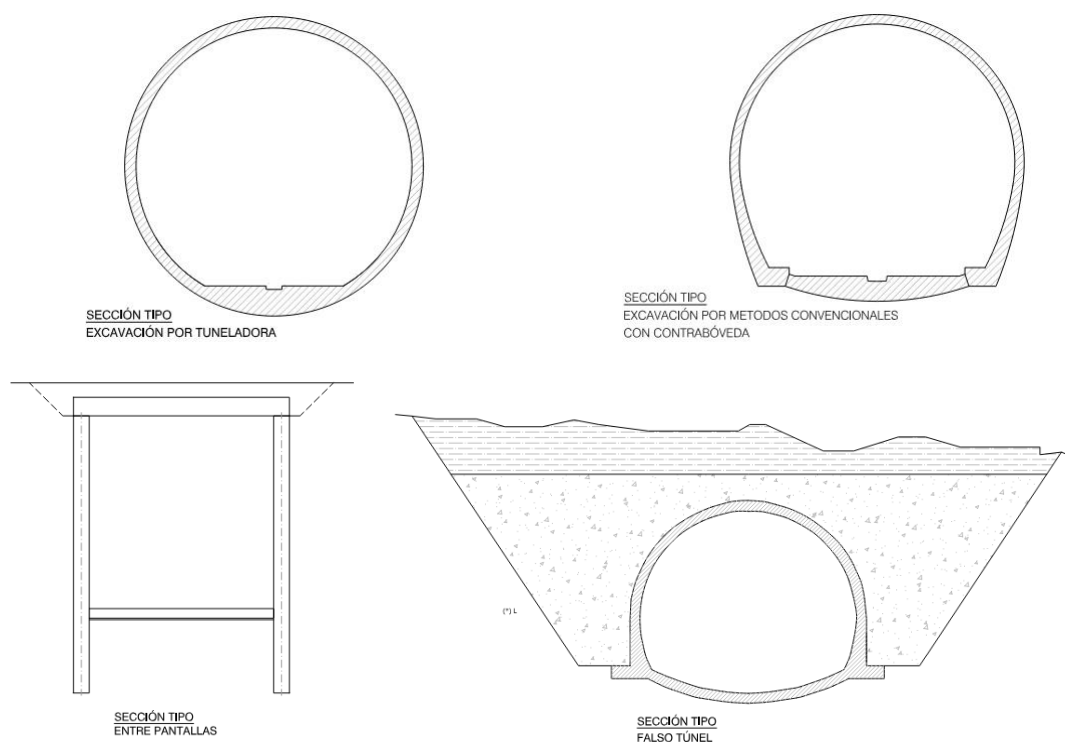
- Restitución de líneas de rotura.
- Delineación.
- Generación del MDT.
- Composición de planos.
- Secciones transversales.

3.5 LEVANTAMIENTO DE TÚNELES

3.5.1 TÚNELES: DEFINICIÓN E IDENTIFICACIÓN

El túnel ferroviario es el conjunto de excavaciones o construcciones, alrededor de las vías, que permite que el ferrocarril pase por debajo del terreno, edificios, agua o incluso por debajo de otros túneles, y que produce un confinamiento transversal de las vías. Además, se incluyen estructuras que creen un confinamiento de las vías en una longitud superior a 50 m. Este confinamiento debe ser, al menos, por encima de las vías y en uno de sus lados, pudiendo estar abierto o parcialmente abierto en el otro lado de las vías.

El túnel ferroviario representa una unidad de gestión y debe incluir todos los tubos paralelos y/o consecutivos que compartan elementos como puntos de evacuación y rescate, zona segura, galería de conexión, etc.



3.5.2 TÚNELES: SISTEMAS DE MEDICIÓN Y CAPTURA

Para el levantamiento de túneles y trincheras con muy poca cobertura GNSS, a diferencia de los tramos a cielo abierto, es necesario utilizar una poligonal o itinerario que recorra el tramo longitudinalmente y que otorgue posición y precisión a todas las bases de la Red Básica, tal y como se describe en el Capítulo 2. A partir de estas bases se dará posición precisa a los puntos de control (PCGs) en el interior del túnel, con una frecuencia de al menos 50 metros y a ambos lados del mismo.

Así, los métodos de medición y captura masiva se apoyarán sobre estos puntos con el fin de conferir coherencia cartográfica al conjunto. Estos métodos podrán ser:

Levantamientos con captura masiva:

- Mobile Mapping.
- Láser escáner terrestre.

Levantamientos con topografía clásica:

- Con estación total y método de radiación directa.

Además, si el proyecto lo requiere, se podrán utilizar sistemas de inspección automatizada, cuyo propósito es capturar, además de la geometría del túnel, imágenes de alta resolución y termográficas, que permiten identificar patologías y deficiencias en el intradós de la sección del túnel.

Se pueden aplicar los mismos parámetros descritos para la plataforma, los viaductos y terraplenes y trincheras, en el [punto 3.2.2.2.](#) para levantamientos con Mobile Mapping y en el [punto 3.2.2.3.](#) para levantamientos con láser escáner terrestre.

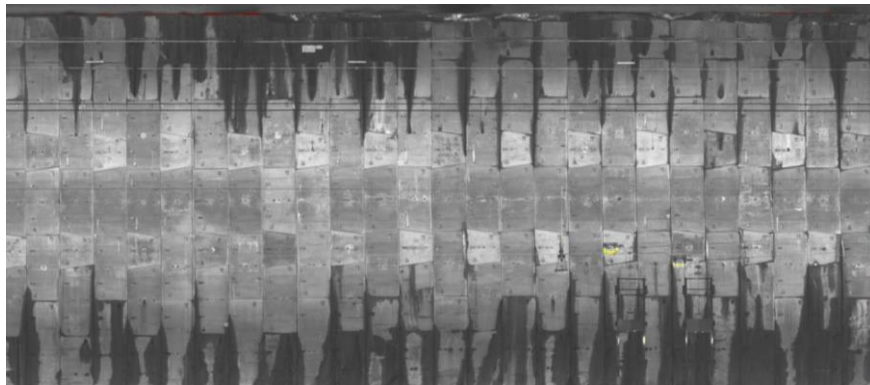
3.5.3 TÚNELES: INSPECCIÓN AUTOMATIZADA

La Inspección Principal en campo del tubo ferroviario se realizará con un equipo láser escáner dinámico sobre diploris, que permita su desplazamiento a una velocidad lo suficientemente baja como para poder detectar de forma detallada los indicios de posibles defectos en el túnel.

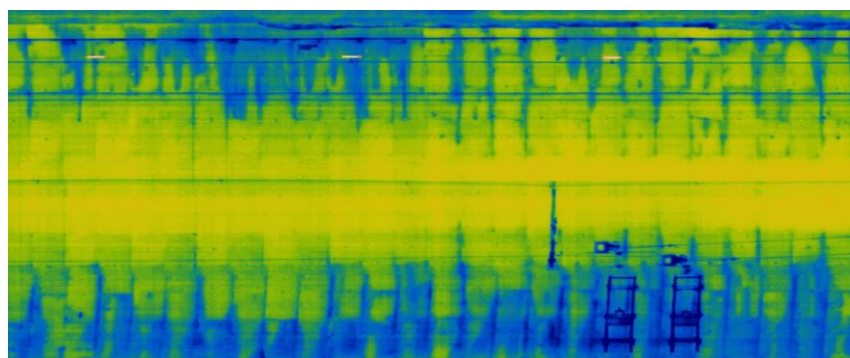
El recorrido de la estructura, se hará en una única pasada, avanzando por los carriles de vía (o por los de una de ellas, en caso de que exista más de una), efectuando la toma de datos con el sistema de inspección automatizada de todos los elementos visibles desde el túnel, es decir, de los hastiales, de la zona superior e inferior de la estructura, de los refugios y pasillos de evacuación, de los sistemas de drenaje y de las canalizaciones.

Los sistemas de inspección automatizada pueden incluir, además, sensores termográficos. Este canal de información, unido al canal visible permite el análisis detallado del interior de la sección de un túnel (bóveda, hastiales y contrabóveda) sobre los cuales realizar una identificación y mapeado de deficiencias y fisuración. Los resultados directos de la captura son 3 canales de información diferenciados:

- Canal visible o imagen albedo: resultante de la representación de reflectancias del LIDAR, este canal representa en B/N un fotograma plano del desarrollo de la sección del túnel.



- Canal infrarrojo o termográfico: resultante de la fusión de fotogramas termográficos, permite la identificación de "puntos fríos" y zonas húmedas, incluso a través de impermeabilizaciones y parches.



- Canal 3D o gálibos: resultante del seccionamiento transversal de la nube de puntos 3D, permite la representación geométrica precisa de cualquier sección transversal del túnel, así como el análisis de gálibos.

En muchos proyectos la inspección automatizada es independiente de la captura del trazado longitudinal del túnel (alineación en planta y perfil longitudinal en alzado), en cuyo caso se podría prescindir del subsistema de posicionamiento y/o trayectoria.

Las características generales del levantamiento para inspección automatizada y de los métodos de captura son las siguientes:

- Puntos por perfil: 8.000 puntos.
- Resolución mínima de 2 mm.
- Captura simultánea en 3 canales: visible (reflectancias o albedo), infrarrojo (o termográfico) y geométrico (3D o gálibos).
- Velocidad del vehículo: entre 2 y 4 km/h.

3.6 LEVANTAMIENTO DE SUPERESTRUCTURA

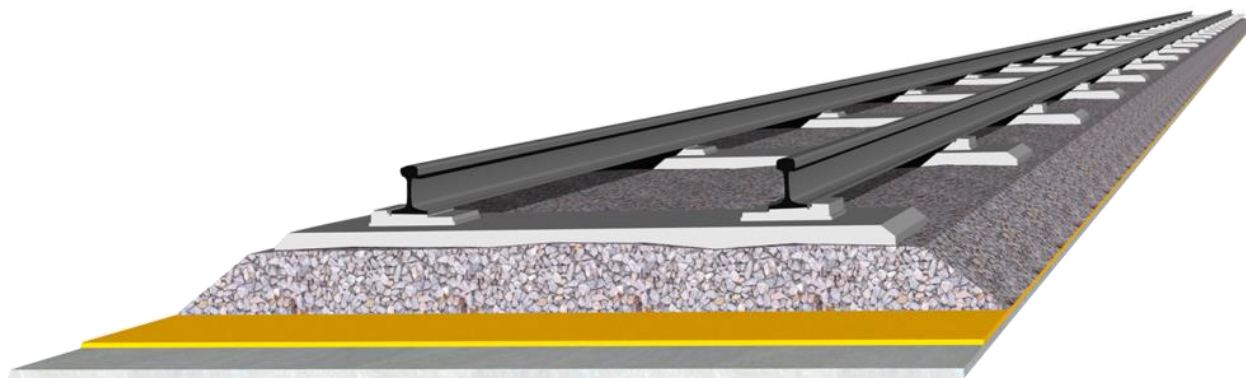
3.6.1 SUPERESTRUCTURA: DEFINICIÓN E IDENTIFICACIÓN

Construida la infraestructura ferroviaria es imprescindible identificar los elementos de la superestructura que permiten la circulación de los trenes. Los elementos más comunes empleados son:

Carriles: son los encargados de dar nombre a este medio de transporte, ya que originalmente eran de hierro. Desde su creación se han empleado distintos tipos de raíles para mejorar su misión de guiar las ruedas del tren. Actualmente son de acero y la mayoría usan el perfil tipo Vignole.

Traviesas: Elementos transversales que sirven para la unión de los raíles y mantener su ancho sin posibilidad de deformación.

Balasto: capa de áridos, de origen granítico y/u ofítico. Ejerce la misión de amortiguar el paso del tren y de evitar las deformaciones del terreno debido al clima. En su lugar se puede instalar una placa de hormigón en la que las traviesas pueden ir embutidas o bien carecer de ellas. A este tipo de superestructura se le considera **vía en placa**.



Toperas: aparatos instalados en el final de la vía para detener un tren en caso de que este, por algún fallo, no pudiera frenar por sí solo.

Desvíos o cambios de aguja: son aparatos que, guiando a las pestañas de las ruedas de los trenes, permiten que estos cambien de una vía a otra.

Señalización ferroviaria: conjunto de elementos que transmiten una serie de signos, indicaciones y órdenes desde la vía a los maquinistas.

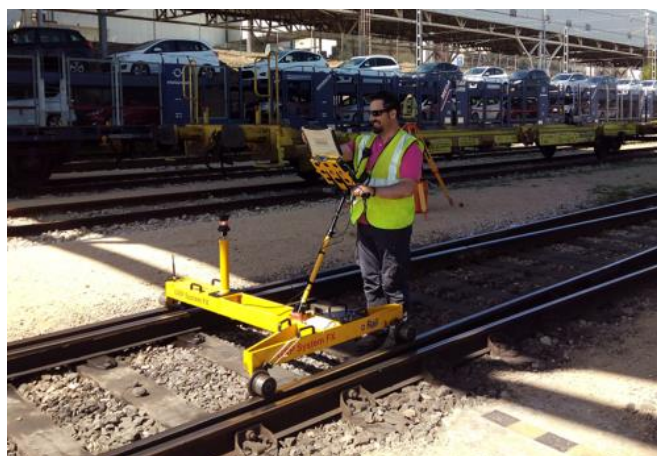


Catenaria: se encuentra instalada en la mayoría de las líneas ferroviarias con la función de transmitir energía eléctrica a la unidad tractora a través de un cable aéreo.

3.6.2 SUPERESTRUCTURA: SISTEMAS DE MEDICIÓN Y CAPTURA

Para la captura de los carriles y contra carriles existen varios métodos en función a la finalidad del proyecto:

- **Levantamiento topográfico para anteproyectos:** en este caso será suficiente con la definición planimétrica y altimétrica del trazado de vía a escala 1:1000 / 1:500. Esto supone que con métodos fotogramétricos sería suficiente para los requisitos del proyecto.
- **Levantamiento topográfico para proyectos de adecuación o modificación de vía:** en estos casos la precisión requerida para la definición planimétrica y altimétrica es mucho mayor, para lo cual se necesita disponer de métodos clásicos de nivelación geométrica para el detalle altimétrico, y capturas con LIDAR, láser escáner terrestre o mobile mapping para el detalle planimétrico. Esto supone la captura simultánea de los carriles y de la capa inmediatamente inferior, con el fin de representar el conjunto de la superestructura que permite la circulación del material rodante.
- **Auscultación de vía:** además, en muchos casos se requiere un levantamiento altamente detallado de los carriles para la representación de perfiles longitudinales y de tablas de peraltes transversales. En estos casos se utilizará el carro auscultador de vía. Para su utilización es necesario, en todo caso, el apoyo sobre una Red Básica de bases bien definida y calculada con precisión, según los métodos y características detallados en el Capítulo II.

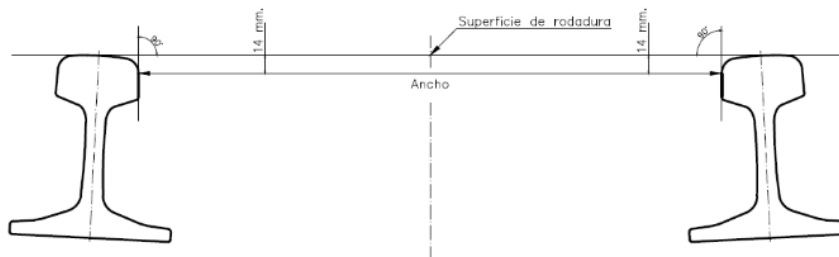


3.6.3 SUPERESTRUCTURA: REPRESENTACIÓN

Para la representación de la vía se utilizarán los siguientes conceptos básicos:

3.6.3.1 Ancho

El ancho es la menor distancia entre líneas perpendiculares a la superficie de rodadura cuya intersección con cada perfil de la cabeza del carril está situada en un punto entre 0 y 14 mm por debajo.



Ancho Pico: son los valores representados por la amplitud entre el valor nominal y el valor pico (valores pico mínimo y máximo).

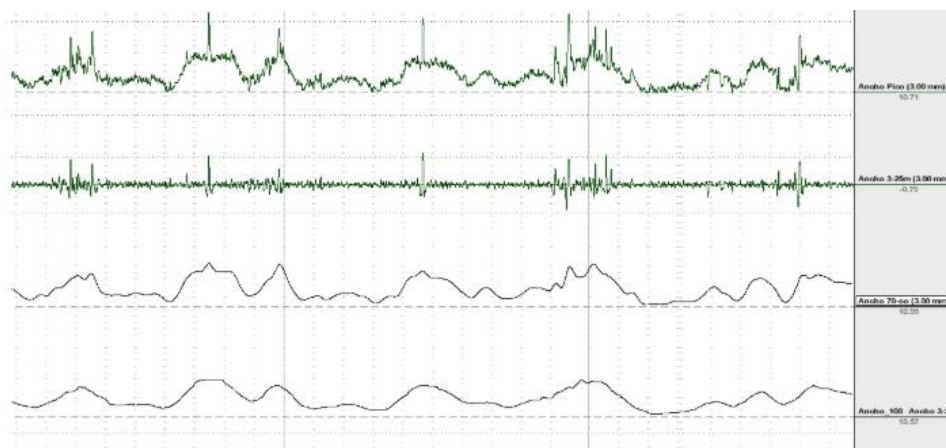
Ancho 100 m: es un término cuasi estático de la amplitud de ancho calculado como valor promedio en el punto central de las mediciones de ancho en una longitud de 100 m.

Ancho 70-Inf o Ancho Qs: es el valor de ancho de cálculo cuasi estático proporcionado por un filtro paso alto como, por ejemplo, en el rango $70\text{ m} < \lambda$.

Variación de Ancho o Ancho D1: es el valor de ancho de cálculo dinámico filtrado en $3\text{ m} < \lambda \leq 25\text{ m}$. o también definido como la diferencia del valor cuasi estático al valor pico.

Variación de Ancho por metro: es la diferencia entre dos mediciones de ancho pico separadas un metro.

El valor del ancho puede ofrecerse como valor total o como la diferencia respecto a la nominal, para distinguir valores positivos con vía abierta y valores negativos con vía cerrada respecto al nominal.



3.6.3.2 Nivelación Longitudinal

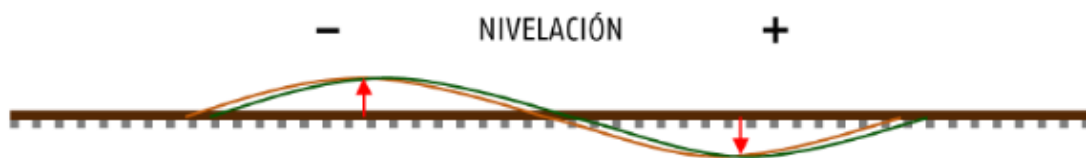
La nivelación longitudinal es la variación de alturas consecutivas de la banda de rodadura de cada carril, expresada como desviación de la posición vertical media (línea de referencia), cubriendo los rangos de longitud de onda estipulados a continuación y calculadas a partir de mediciones sucesivas.

Rango de longitud de onda (λ):

- D1 u Onda Corta: $3 \text{ m} < \lambda \leq 25 \text{ m}$.
- D2 u Onda Media: $25 \text{ m} < \lambda \leq 70 \text{ m}$.
- D3 u Onda Larga: $70 \text{ m} < \lambda \leq 150 \text{ m}$.

Nivelación longitudinal D0 (1-3 m): es el valor de nivelación longitudinal de cálculo dinámico filtrado en $1 \text{ m} < \lambda \leq 3 \text{ m}$. Este parámetro también puede ser medido con el sistema de Desgaste Ondulatorio.

Al medir en el dominio D0, la distancia de muestreo se debería reducir a 0,1 m. Se toma como valores positivos cuando el carril se encuentra por debajo de la línea de referencia.



3.6.3.3 Peralte o Nivelación Transversal

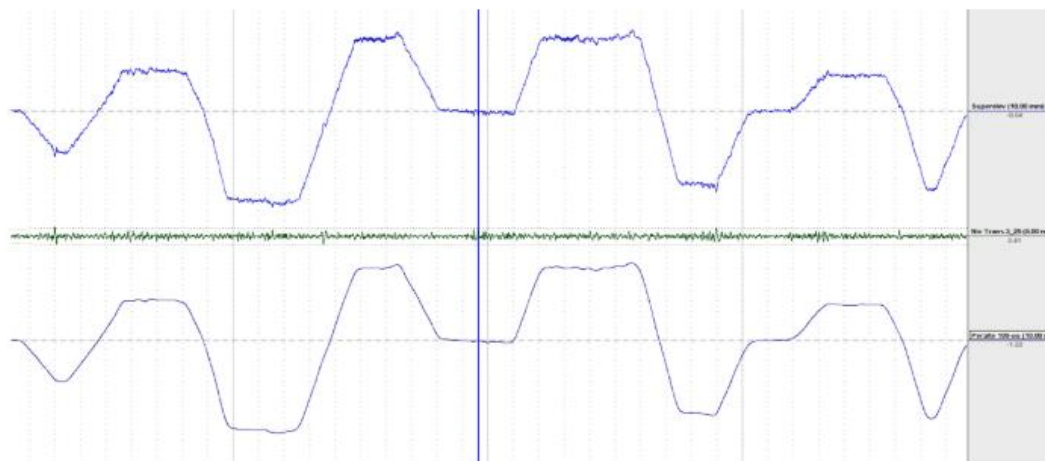
Se determina considerando la diferencia en altura entre los círculos de rodadura de las ruedas de un mismo eje. La distancia entre los círculos de rodadura (L) se tomará como se indica en la siguiente tabla:

Para anchos de vía nominales de:	1.668 mm	1.435 mm	1.000 mm
Distancia entre los círculos de rodadura (L):	1.733 mm	1.500 mm	1.055 mm

Peralte Pico: es la amplitud de peralte entre la línea cero y el valor pico.

Peralte 70-Inf o Qs: es el valor de peralte de cálculo cuasi estático proporcionado por un filtro paso alto como en el rango $70 \text{ m} < \lambda$. También es usado como valor cuasi estático el filtro en 100 m, con resultado similar al anterior.

Variación de Nivelación Transversal o D1: es el valor de peralte de cálculo dinámico filtrado en $3 \text{ m} < \lambda \leq 25 \text{ m}$. o también definido como la diferencia del valor cuasi estático al valor pico.



3.6.3.4 Alineación

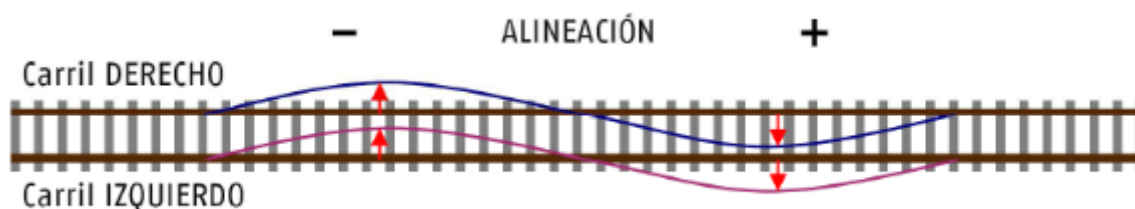
La alineación es la desviación de la posición horizontal media (línea de referencia) cubriendo los rangos de longitud de onda estipulados a continuación y calculada a partir de mediciones sucesivas.

Rango de longitud de onda (λ):

- D1 u Onda Corta: $3 \text{ m} < \lambda \leq 25 \text{ m}$.
- D2 u Onda Media: $25 \text{ m} < \lambda \leq 70 \text{ m}$.
- D3 u Onda Larga: $70 \text{ m} < \lambda \leq 200 \text{ m}$.

Las mediciones de alineación se realizan mediante un sistema inercial o sistema de medición verseno (también denominado como medición por flecha) que debería ser preferente asimétrico, o bien mediante una combinación de ambos métodos.

Se toma como valor positivo cuando el carril derecho está más cercano al eje de la vía y para el hilo izquierdo cuando se aleja del eje. Es decir, sentido positivo con curvatura tomada a la derecha.



3.6.3.5 Alabeo

Alabeo se define como la diferencia algebraica entre dos nivelaciones transversales tomadas a una distancia de separación definida, expresada generalmente como un gradiente entre los dos puntos de medición. El alabeo se puede expresar como una relación (‰ o mm/m). Las mediciones del alabeo se deberían tomar

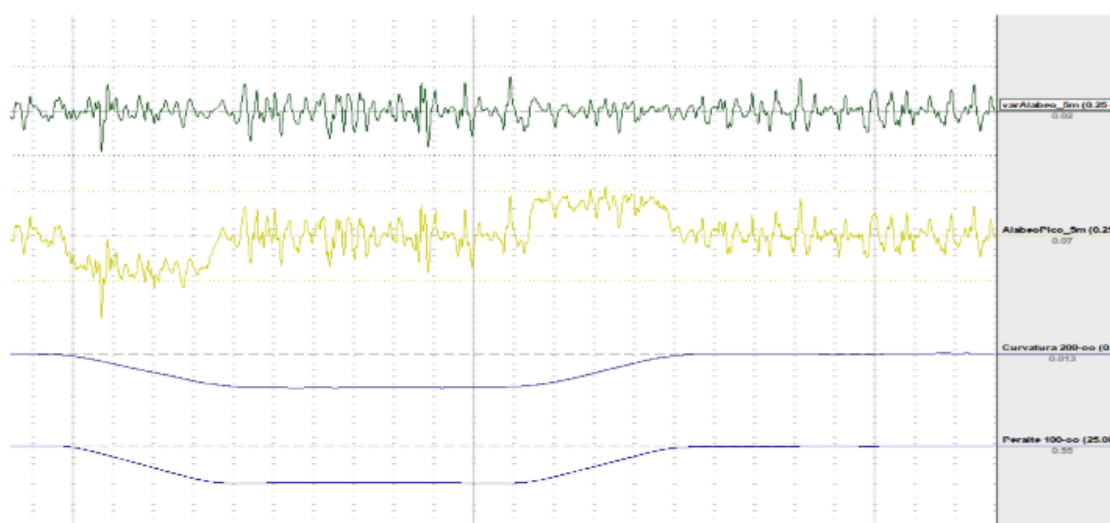
simultáneamente a una distancia fija, por ejemplo, a una distancia equivalente a la que existe entre ejes, o bien calculadas a partir de mediciones consecutivas de nivelación transversal.

Alabeo Pico: es la amplitud de alabeo entre la línea cero y el valor pico.

Variación Alabeo o Alabeo D1: es la amplitud de alabeo de cálculo dinámico en $3\text{ m} < \lambda < 25\text{ m}$. o también definido como la diferencia del valor medio al valor pico.

La diferencia entre ambos parámetros está en la afección del trazado sobre la medida. Cuando existe una curva de transición en la que el peralte varía de un valor nulo en recta a uno constante en plena curva o viceversa, aparece un alabeo constante en el parámetro de Alabeo Pico. La señal de Variación de Alabeo es filtrada en onda corta, por lo que no existe valor constante por la transición a curva.

El alabeo es positivo cuando la nivelación transversal del punto de referencia es mayor que la del establecido anteriormente a la distancia de la base a medir.



CAPITULO 4- GEOMATICA APLICADA A LA EDIFICACION

4.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se hace referencia a los métodos y sistemas más adecuados para el levantamiento topográfico de los activos relacionados con edificación y arquitectura.

Antes de abordar cuestiones relacionadas con los trabajos de campo, se debe determinar el orden de magnitud, alcance y dimensiones generales de los activos a representar, ya que la forma y el método difieren al resto debido a su tratamiento específico en coordenadas “planas” (sin aplicación de coeficiente de anamorfosis lineal) y, por lo tanto, sin factor de escala. De ahí que se aborden en un capítulo independiente.

Esto es, aunque la posición de los activos se debe representar en coordenadas UTM, esta cuestión entra en conflicto directo con la proyección de distancias horizontales, que en realidad deben representarse en verdadera magnitud. Así, el mejor punto de partida es la definición de un contorno o área independiente del proyecto donde se utilizará solo y exclusivamente la representación en coordenadas planas.



4.2 LEVANTAMIENTO DE ESTACIONES Y EDIFICIOS TÉCNICOS

4.2.1 GEORREFERENCIACIÓN TOPOGRÁFICA

De cara a resolver el problema expuesto en la introducción, se deberá proponer la definición de un contorno o área independiente del proyecto que incluya la estación, los apeaderos, andenes y edificios técnicos objeto de estudio. Así, se podrá trabajar en el interior de esa zona con coordenadas exclusivamente planas.

Para ello, partiendo de las bases de la Red Principal más cercanas e interiores al contorno definido, se realizará un "recálculo" de la posición UTM de las mismas bajo las siguientes premisas:

- La base más céntrica o equidistante a las demás bases será el origen de las coordenadas planas. Además, si esta base se sitúa cerca del eje del trazado ferroviario mucho mejor, de cara a respetar los metrajes de vía y sus coordenadas UTM originales.
- Se respetarán los acimutes y direcciones al resto de bases seleccionadas en el área de interés, pero se recalcularán las coordenadas de estas sin aplicar coeficiente de anamorfosis lineal ni reducción al horizonte.
- Así, las distancias reducidas calculadas a partir de las coordenadas recalculadas entre bases deberán coincidir con las distancias reales en su verdadera magnitud.

Con este primer paso ya se dispondrá de un marco topográfico en coordenadas planas para la realización de cualquier levantamiento posterior y, sobre todo, para la definición de los GCPs necesarios en este sistema "local", sobre los cuales apoyar las capturas masivas.

En cualquier caso, si el área a considerar es relativamente pequeña, o solamente afecta a un solo edificio de dimensiones razonables (no más de 100 x 100 m., por ejemplo), se podrán utilizar las bases de la Red Básica sin recalcular, y a partir de una de ellas levantar y calcular los GCPs en coordenadas planas. Esto sería suficiente para un encaje adecuado sin superar las tolerancias que requiere el proyecto.

4.2.2 SISTEMAS DE MEDICIÓN Y CAPTURA

Los métodos más utilizados para la medición y captura de la estación, los apeaderos, andenes y edificios técnicos objeto de estudio son los siguientes:

Levantamientos con captura masiva:

- **Fotogrametría aérea:** para exteriores y cubiertas, zonas abiertas, solares y playas de vías.
- **Láser escáner terrestre:** para cualquier elemento dentro del contorno, desde exteriores a interiores, y sobre todo en estos últimos, donde la captura resulta muy operativa y rápida.

Levantamientos con topografía clásica:

- **Con GPS en RTK:** en zonas donde la cobertura GNSS sea adecuada y los edificios cercanos no ocluyan el horizonte y permitan una operativa ágil.
- **Con estación total y método de radiación directa:** al igual que en el caso anterior, pero donde además la mala cobertura GPS y el horizonte no ofrecen garantías para un levantamiento en RTK.

Todos estos métodos son complementarios y nunca excluyen uno al otro. De hecho, lo más habitual es utilizar uno o varios sistemas de captura masiva para el levantamiento general de la zona objeto de estudio y, además, completar los detalles con métodos de topografía clásica (servicios afectados, arquetas, señalización, aparatos de vía...).

4.2.2.1 Levantamientos con dron /UAV

Las fotografías aéreas son el producto básico para la creación de la nube de puntos y ortofotomapas y por lo tanto depende de su calidad y precisión el correcto resultado de todos los sucesivos pasos. Se deberán tener muy en cuenta además las siguientes cuestiones:

- La resolución se expresa en píxeles/cm y representa el tamaño que ocupa cada pixel en la foto realizada. Dependiendo de las necesidades de cada proyecto es posible obtener resoluciones que van desde 1cm/pixel hasta 12cm/pixel. Para ello pueden variar el tipo de lente, resolución de la cámara y altura de vuelo. Por regla general, mayor resolución implica volar más bajo y más lento, lo que exige más tiempo en el aire, lo que a su vez implica realizar más vuelos.
- La calidad de las fotos es fundamental para obtener los píxeles/cm deseados. Se necesita que la foto sea nítida para alcanzar la resolución real de la cámara, pues de lo contrario, en una foto borrosa, movida o de poca resolución, no se podrá identificar con precisión los puntos de control ni realizar de manera eficaz la triangulación de la información. La nitidez significa que la imagen adquirida por el dron es estática, sin movimiento.
- La precisión de un levantamiento topográfico realizado con dron / UAV se basa en la diferencia que puede surgir entre las coordenadas de un punto determinado en el terreno y las coordenadas obtenidas del mismo punto en la reconstrucción tridimensional.
- Por el contrario, sin puntos de control en el suelo, pueden aparecer en la reconstrucción deformaciones, abultamientos o depresiones, e incluso inclinación en todo el terreno. En un mal proceso pueden aparecer diferencias de hasta 3 metros en los ejes XY (latitud y longitud de los puntos geográficos) y hasta 30m en Z (altitud) Este tipo de errores se solucionan al contar con puntos de control con coordenadas conocidas. De esta manera es posible enlazar y acomodar el levantamiento aéreo con los puntos de control en el suelo (GCP). Los puntos de control se ubican y marcan con métodos tradicionales topográficos empleando estaciones totales robóticas, sistemas GPS RTK, etc, y deben estar enlazadas a la red geodésica. Cuantos más puntos se tengan y mejor distribuidos estén sobre el terreno, más preciso será el resultado final. La distribución y densidad de los GCP la determina el especialista fotogramétrico en base al terreno que vaya a reconstruir y las características de la cámara y altitud de vuelo.

A continuación, se presenta aproximadamente la relación calidad / resolución en función a las características del vuelo y de los puntos de control y su distribución, así como las escalas de trabajo en cada caso, para la definición de la plataforma de vía:

	Fotogrametría aérea				LIDAR aerotransportado			
	AGL 80 m. Solape L/T 70%/80%	AGL 80 m. Solape L/T 80%/90%	AGL 120 m. Solape L/T 70%/80%	AGL 120 m. Solape L/T 80%/90%	AGL 60 m. Solape T 85%	AGL 80 m. Solape T 80%	AGL 100 m. Solape T 75%	AGL 120 m. Solape T 70%
GSD - tamaño de pixel	2,5 cm.	2,0 cm.	3,0 cm.	2,5 cm.	-	-	-	-
Precisión Horizontal	5 cm.	4 cm.	6 cm.	5 cm.	1,5 cm.	2,0 cm.	2,5 cm.	3,0 cm.
Precisión Vertical	7,5 cm.	6 cm.	9 cm.	7,5 cm.	2 cm.	3 cm.	4 cm.	4,5 cm.
Resolución Nube de Puntos (ptos/m3)	≈300	≈400	≈100	≈200	-	-	-	-
Resolución Nube de Puntos (ptos/m2)	-	-	-	-	≈3000	≈2500	≈2000	≈1500
Escala de trabajo	1/500	1/200	1/1000	1/500	1/200	1/200	1/500	1/500
Int. mínimo entre curvas de nivel	25 cm.	10 cm.	50 cm.	25 cm.	10 cm.	10 cm.	25 cm.	25 cm.
Puntos de Control por Ha.*	≈0,5	≈0,4	≈0,3	≈0,2	≈0,4	≈0,3	≈0,2	≈0,1

*Calculado para un mínimo de 50 Has. Al menos 5 puntos de control por proyecto.

Esta tabla no es de estricto cumplimiento y las condiciones del levantamiento se deberán establecer para cada caso, pero puede servir de base para la definición de las características generales del proyecto.

4.2.2.2 Levantamientos con láser escáner terrestre

Para la captura de datos con láser escáner y su posterior registro en coordenadas relativas se podrán utilizar esferas de alta reflectancia ubicadas en las zonas de solape entre escaneos, de modo que permitan un encaje preciso entre ellos de cara a una georreferenciación posterior sólida.

Se configurará el equipo laser escáner a una resolución media y se capturarán escaneos de forma consecutiva a lo largo de la trayectoria, alternando a ambos lados de la plataforma, siempre con el fin de solapar escaneos y minimizar las zonas de sombra.

El procesado de toda esta información requiere de un exhaustivo conocimiento del método y de rigor en la aplicación del mismo, de cara a optimizar tiempos y resultados. A continuación, se describen las principales fases de cara a la obtención de una nube de puntos densa consolidada, coherente y precisa, sobre la cual trabajar para la generación de planos y modelos 3D:

Filtrado de los escaneos

El primer paso en gabinete, y una vez realizada la comprobación del conjunto con un registro nube a nube previo en campo, es cargar por completo todos y cada uno de los escaneos y aplicar diferentes filtros para la optimización de la nube:

- Filtro por valores de reflectancia (puntos oscuros)
- Filtro de puntos dispersos
- Filtro por distancia
- Filtro de suavizado
- Filtro de color

Registro de los escaneos en coordenadas relativas

A continuación, se procederá a la unión precisa y consolidada de los diferentes escaneos entre sí en un solo bloque, que tendrá carácter local y relativo.

El registro nube a nube permite la obtención de encajes muy precisos en el orden del milímetro. Para ello es necesario realizar agrupamientos de escaneos que contengan zonas comunes y donde el solape sea evidente.

Cada agrupamiento se registrará por separado y se analizarán las posibles desviaciones de cada uno, realizando subagrupamientos cuando sea necesario hasta que cada registro independiente sea preciso y coherente. Una vez completados los agrupamientos por separado se procederá a la unión completa del bloque, también con el método de registro nube a nube.

Para la comprobación y control de la calidad de la unión del bloque se utilizarán elementos estructurales más complejos (planos, losas, cilindros) o referencias artificiales (esferas o dianas) que, identificados desde varios escaneos y comparados entre sí en posición y dimensiones, nos permitan analizar los residuos finales del registro y validar el proceso siempre que estos residuos estén por debajo de la tolerancia.

Aplicación de color y compensación de la nube

El siguiente paso para la generación de un resultado de calidad es la aplicación de color. En esta fase se dará a cada punto un valor RGB, correspondiente al del pixel del fotograma ubicado en la misma dirección sobre la panorámica.

Es fundamental la compensación de color entre escaneos, ya que una misma superficie se puede percibir con dos gamas de color diferentes desde dos ubicaciones diferentes. La exposición de cada fotograma tampoco será igual a la del siguiente, con lo cual la cantidad de color y contraste tampoco lo será. La compensación producirá un suavizado y fusionado de las gamas entre escaneos contiguos.

Registro del bloque en coordenadas locales

Para la referenciación recurriremos a los puntos materializados sobre el terreno y observados con tecnología topográfica centimétrica. Identificaremos estos puntos sobre el bloque generado y realizaremos una transformación del sistema de coordenadas, convirtiéndolo en un elemento perfectamente encajado en el sistema topográfico local (sistema de coordenadas locales).

A continuación, se presenta aproximadamente la relación calidad / resolución en función a las características del levantamiento y de los puntos de control y su distribución, así como las escalas de trabajo en cada caso:

	Interiores: distancias menores de 5 m.	Interiores: distancias menores de 15 m.	Exteriores: distancias menores de 25 m.	Exteriores: distancias menores de 50 m.
Precisión Relativa Horizontal / Vertical	± 1 mm.	± 2 mm.	± 5 mm.	± 10 mm.
Resolución Nube de Puntos (distancia entre puntos)	± 3 mm.	± 5 mm.	± 10 mm.	± 15 mm.
Escala de trabajo	1/100	1/200	1/200	1/500
Int. mínimo entre curvas de nivel	5 cm.	10 cm.	10 cm.	25 cm.

4.2.3 SERVICIOS AFECTADOS

En las proximidades de las zonas objetivo de estudio de este capítulo, a saber, estaciones, andenes, apeaderos y edificios técnicos, encontraremos muy habitualmente canalizaciones enterradas, arquetas e instalaciones. Para el levantamiento de estos activos debemos utilizar, además de sistemas topográficos de captura y georreferenciación, herramientas de inventariado y de caracterización de los elementos existentes.

Así, de cada a configurar una base de datos compatible con cualquier SIG coexistente con el proyecto, se deberán clasificar los elementos en categorías y enumerar los parámetros que deben incluirse en el inventario de cada uno de los mismos.

4.2.4 REPRESENTACIÓN

4.2.4.1 Planos topográficos generales

Una vez realizado el levantamiento y el procesado de la información, las fases de trabajo en gabinete para la generación de planos topográficos generales serán las siguientes:

- Restitución de líneas de rotura: se vectorizarán las aristas que configuran la sección tipo de la plataforma, andenes y apeaderos, desde la más interior (unión con la capa de balasto o de placa), hasta la más lejana al eje (arista de explanación).
- Delineación: todo aquel elemento susceptible de representación a la escala requerida se delineará según los protocolos y características requeridas. A este grupo pertenecen las obras de fábrica, canalizaciones, arquetas, estructuras, muros, bordillos, pozos, cimentaciones, drenajes, edificaciones, casetas, y cualquier otro elemento representable en planos topográficos.
- Generación del MDT: a partir de los puntos del terreno clasificados y de las líneas de rotura se generará el MDT utilizando métodos de triangulación y aplicando las reglas básicas para la definición de superficies topográficas.
- Composición de planos: según los criterios definidos en el proceso cartográfico y los requerimientos del proyecto, se procederá a la generación de planos, que incluyen, entre otros elementos:

Planimetría: delineación por capas y representación geométrica según escala.

Altimetría: curvas de nivel y puntos de cota.

Toponimia: nomenclatura de municipios, barrios, áreas y pedanías, así como la definición de ríos, cauces, arroyos, cimas y divisorias.

Parcelario: en caso de que el proyecto lo requiera, se podrá representar la estructura de superficies que configuran la distribución parcelaria y/o catastral del área de interés.

- Secciones transversales: a partir de la definición del eje de trazado y del intervalo requerido, se podrán representar las secciones transversales de la plataforma, andenes y apeaderos, que deberán incluir todos los quiebros definidos por las aristas del perfil.

4.2.4.2 Planos de arquitectura

Para la representación de planos de arquitectura de los edificios técnicos y estaciones, se podrán utilizar herramientas de modelado BIM según las especificaciones del proyecto. De este modo, podremos obtener planos de arquitectura de todos los niveles y representaciones diferentes en función al objetivo de cada plano (usos, áreas, mediciones, demolición, fases de construcción...).

Para obtener más información detallada sobre los protocolos de modelado y de representación BIM, se deberá consultar el [Manual BIM de ETS](#).

CAPITULO 5– INGENIERÍA GEOESPACIAL APLICADA

5.1 INTRODUCCIÓN

La ingeniería geoespacial desempeña un papel fundamental en la gestión y análisis de datos espaciales debido a su capacidad para capturar, almacenar, analizar y visualizar información geográfica de manera efectiva. A continuación, se detallan algunas razones clave que resaltan la importancia de la ingeniería geoespacial en este contexto:

1. **Toma de Decisiones Basada en la Localización:** La información geoespacial proporciona contexto y ubicación a los datos, lo que permite a los tomadores de decisiones comprender mejor los patrones espaciales y tomar decisiones informadas basadas en la ubicación.
2. **Planificación Urbana y Gestión del Territorio:** La ingeniería geoespacial es fundamental para la planificación urbana, el desarrollo sostenible y la gestión del territorio, ya que permite analizar la distribución espacial de recursos, infraestructuras y población.
3. **Gestión de Recursos Naturales:** En el ámbito ambiental, la ingeniería geoespacial facilita la monitorización y gestión de recursos naturales como bosques, suelos, agua y biodiversidad, contribuyendo a la conservación y uso sostenible de los mismos.
4. **Servicios de Emergencia y Seguridad:** La capacidad de visualizar datos espaciales en tiempo real es crucial para la gestión de emergencias, la planificación de rutas de evacuación y la respuesta a desastres naturales.
5. **Optimización de Infraestructuras:** La ingeniería geoespacial se utiliza para planificar y optimizar la ubicación de infraestructuras como carreteras, redes de transporte, redes de distribución de servicios públicos, entre otros, mejorando la eficiencia y reduciendo costos.
6. **Análisis de Mercado y Comportamiento del Consumidor:** En el ámbito comercial, la información geoespacial se utiliza para analizar patrones de consumo, identificar áreas de mercado potenciales y tomar decisiones estratégicas basadas en la ubicación.

5.1.1 CONCEPTOS FUNDAMENTALES

Georreferenciación

La georreferenciación es el proceso de asociar datos o información con una ubicación geográfica específica en la Tierra. Consiste en asignar coordenadas geográficas (latitud y longitud) a un objeto, lugar o evento para representar su posición de manera precisa en un sistema de referencia espacial.

Metadatos

Los metadatos son datos que proporcionan información acerca de otros datos. En el contexto de los datos espaciales, los metadatos describen las características, calidad, origen, formato y otros aspectos relevantes de los conjuntos de datos geoespaciales. Ayudan a comprender, gestionar y utilizar eficazmente la información geográfica.

Sistemas de Referencia Geográfica (SRG)

Los sistemas de referencia geográfica son marcos de referencia que se utilizan para definir y representar la posición de objetos o fenómenos en la superficie terrestre. Incluyen sistemas de coordenadas, datum geodésicos y proyecciones cartográficas que permiten la representación precisa de la información geoespacial.

Datos Geoespaciales

Los datos geoespaciales son conjuntos de información que contienen componentes espaciales, como coordenadas geográficas, límites territoriales, puntos de interés o cualquier otra información relacionada con la ubicación en la Tierra. Pueden incluir mapas, imágenes satelitales, modelos digitales de elevación, entre otros.

Servicios Web Geoespaciales:

Los servicios web geoespaciales son aplicaciones informáticas que permiten el intercambio de datos geoespaciales a través de Internet. Incluyen servicios de visualización de mapas, consultas espaciales, análisis geográfico y otras funcionalidades que facilitan el acceso y la interoperabilidad de la información geográfica.

5.1.2 HERRAMIENTAS Y RECURSOS

Para la publicación de datos espaciales, existen diversas herramientas, normas y formatos que son útiles y ampliamente utilizados en la industria geoespacial. A continuación, se mencionan algunos de ellos:

Herramientas

- **QGIS:** Un Sistema de Información Geográfica de código abierto que permite visualizar, analizar y editar datos espaciales.
- **ArcGIS Online:** Plataforma de Esri que facilita la publicación y compartición de mapas y datos espaciales en la nube.
- **GeoServer:** Servidor de código abierto que permite compartir y editar datos geoespaciales a través de estándares abiertos.
- **Mapbox:** Plataforma que ofrece herramientas para la creación de mapas interactivos y la publicación de datos espaciales.
- **Leaflet:** Biblioteca de JavaScript para la creación de mapas interactivos en aplicaciones web.

Normas

- **ISO 19115:** Norma internacional para la descripción de metadatos geoespaciales, que proporciona un marco común para la documentación de conjuntos de datos espaciales.
- **OGC (Open Geospatial Consortium):** Organización que desarrolla estándares abiertos para datos geoespaciales, como WMS (Web Map Service) y WFS (Web Feature Service).
- **INSPIRE:** Marco legislativo de la Unión Europea para el establecimiento de una Infraestructura de Información Espacial en Europa, que define estándares para la publicación de datos geoespaciales.

Formatos

- **GeoJSON:** Formato ligero basado en JSON para representar datos geoespaciales, ampliamente utilizado en aplicaciones web y servicios de mapas.
- **KML (Keyhole Markup Language):** Formato XML para representar datos geoespaciales en mapas interactivos, compatible con Google Earth y Google Maps.
- **Shapefile:** Formato de archivo vectorial ampliamente utilizado en Sistemas de Información Geográfica para almacenar datos geoespaciales.
- **GML (Geography Markup Language):** Formato XML para el intercambio de datos geoespaciales, compatible con estándares de la OGC.

- **GeoPackage:** Implementado sobre la base de datos relacional SQLite permite compartir y transferir datos espaciales vectoriales y ráster. Además, permite almacenar varias geometrías dentro del mismo archivo al contrario que los Shapefiles que únicamente almacenan una.

Estas herramientas, normas y formatos proporcionan un marco sólido para la publicación de datos espaciales, facilitando su acceso, interoperabilidad y reutilización en diferentes contextos y aplicaciones geoespaciales. Al utilizar estas herramientas y seguir estas normas, se promueve la estandarización y la calidad en la publicación de datos espaciales, lo que contribuye a su efectiva difusión y uso en la comunidad geoespacial.

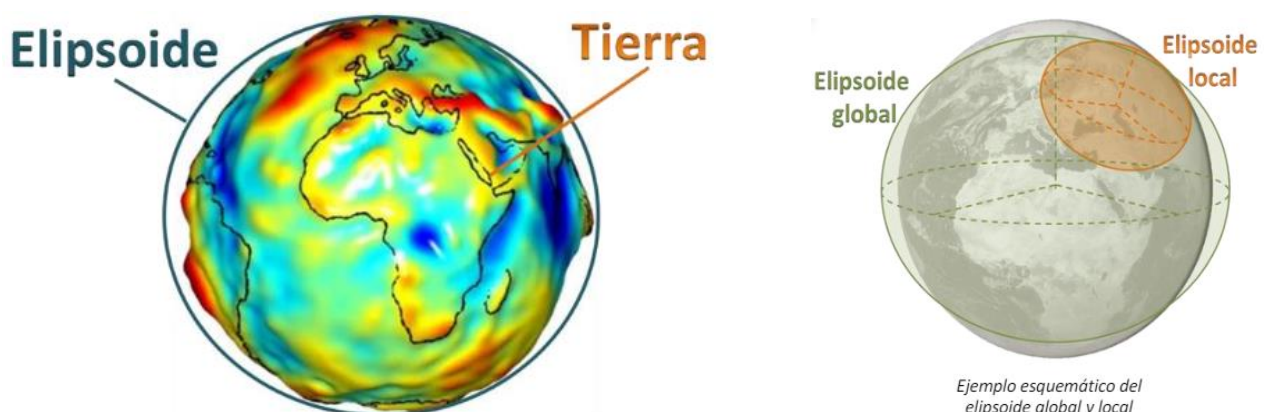
Para obtener más detalles sobre las mejores prácticas en la publicación de datos espaciales, se puede hacer referencia al documento "Spatial Data on the Web Best Practices" publicado por el W3C (World Wide Web Consortium). Este documento proporciona pautas y recomendaciones para la publicación efectiva de datos espaciales en la web, abordando aspectos como la geocodificación de datos, la utilización de sistemas de referencia geográfica adecuados, la codificación precisa de coordenadas, la descripción de cambios en los datos espaciales, entre otros temas relevantes.

5.2 OBTENCIÓN Y PRODUCCIÓN DE INFORMACIÓN GEORREFERENCIADA

5.2.1 SISTEMAS GEODÉSICOS Y PROYECCIONES CARTOGRÁFICAS

5.2.1.1 Sistemas Geodésicos de Referencia

La representación visual de la información geográfica generalmente se hace sobre una superficie plana, un mapa. Este proceso se conoce como Proyección Cartográfica. Pero para aplicarla es necesario un Sistema de Referencia de Coordenadas (SRC) que relacione los puntos georreferenciados en la tierra con los de un mapa referenciado en el plano. La complejidad a la hora de aplicar la proyección cartográfica reside en que la forma de la tierra es irregular, no es una esfera, sino un geoide. Por eso se busca una figura geométrica que se asemeje a dicha forma, como los elipsoides de referencia, resultado de la revolución de una elipse.



El siguiente paso es la determinación de los parámetros que definen el elipsoide, como su tamaño, su posición y orientación con respecto a la Tierra. El conjunto de estos parámetros es lo que define como Sistema Geodésico de Referencia (SGR) o Datum.

La posición de los elipsoides con respecto a la Tierra diferencia los SGR locales, si solo se adaptan a una zona de la Tierra, por ejemplo, el ETRS89, empleado en la zona territorial europea, o los elipsoides globales que se adaptan a toda la Tierra, como el WGS84. Para establecer las coordenadas geográficas de un punto, se asignan la latitud y la longitud:

- Latitud (φ o \emptyset): es el ángulo formado entre la línea que une el punto y el centro de la esfera (o elipsoide) con el plano del Ecuador.
- Longitud (λ): es el ángulo formado entre dos planos que contienen a la línea de los Polos.
- En geodesia, existirán dos Datum: el horizontal y el vertical, siendo este último la superficie de referencia respecto a la que se definen las altitudes, la tercera coordenada.

La determinación de la posición de puntos sobre la superficie terrestre mediante coordenadas (latitud, longitud, altura) es una parte fundamental de la geodesia y la materialización de estos puntos sobre el terreno constituye las redes geodésicas, conformadas por una serie de vértices geodésicos o señales de nivelación que configuran la base de la cartografía de un país.

En España se ha adoptado el sistema ETRS89 (European Terrestrial Reference System 1989) como sistema de referencia geodésico oficial para la referenciación geográfica y cartográfica en el ámbito de la Península Ibérica y las Islas Baleares. En el caso de las Islas Canarias, se ha adoptado el sistema REGCAN95. Ambos sistemas tienen asociado el elipsoide GRS80 y están materializados por el marco que define la Red Geodésica Nacional por Técnicas Espaciales, REGENTE, y sus densificaciones en el REAL DECRETO 1071/2007, de 27 de julio, por el que se regula el sistema geodésico de referencia oficial en España.

5.2.1.2 Proyecciones Cartográficas

Una Proyección Cartográfica es una conversión de coordenadas desde un sistema de coordenadas geodésicas a uno plano [ISO 19111], por tanto, permiten transformar una superficie esférica irregular, como es la de la Tierra, en una superficie lisa como es la de un mapa. El objetivo es representar la superficie terrestre, o una parte de ella, en un mapa convirtiendo coordenadas geográficas (esféricas) en coordenadas cartesianas (métricas) para representar en un plano (2D) un objeto tridimensional (3D) como es la Tierra, utilizando como soporte para realizar esta transformación una red de meridianos y paralelos, en forma de malla.

Toda proyección implica distorsión, sin embargo, es posible conservar algunas propiedades métricas. En función de ellas, las proyecciones se pueden clasificar en:

- Equivalente: conserva las áreas (utilizada para la representación de parcelarios).
- Conforme: conserva los ángulos y la forma de los objetos (utilizada para la navegación).
- Equidistante: conserva las distancias.
- Afiláctica o modificada: no conserva ni ángulos, superficies ni distancias, pero las deformaciones son mínimas.

En función de la distorsión y de la zona del país, se utiliza una proyección u otra como, por ejemplo:

- UTM,
- Cónica Conforme de Lambert,
- Mercator,
- Peters y Winkel-Tripel

El intercambio eficiente de datos de localizaciones geográficas puntuales requiere formatos que sean universalmente interpretables y que permitan la identificación de puntos en la superficie de la Tierra. La latitud y la longitud se pueden expresar en grados y decimas de grado o utilizando grados, minutos y segundos.

Formato	Ejemplo
g° m' s",sssss (grado, minuto, segundo)	Longitud: -2° 40' 15,17806" Latitud: 42° 50' 23,62928"
g°,ggggggggg (grado y decimas de grado)	Longitud: 2°,670882794 Latitud: 42°,83989702

La norma ISO 6709 "Representación normalizada de localización geográficas puntuales mediante coordenadas" es la norma que define la Latitud y la Longitud. El RD 1071/2007 que oficializa el sistema geodésico de referencia oficial, indica además que se adoptan proyecciones diferentes en función de la escala de los mapas producidos. En concreto, la proyección Transversal Universal de Mercator (UTM) para mapas en escalas superiores a 1:500.000, y la proyección Cónica Conforme de Lambert para escalas inferiores o iguales.

5.2.2 REPRESENTACIÓN E INFRAESTRUCTURA DE DATOS ESPACIALES

5.2.2.1 Representación

Teniendo en cuenta el formato y precisión de las coordenadas geográficas y el sistema geodésico de referencia, un mismo lugar se puede representar de múltiples formas tal como se puede observar en el siguiente ejemplo obtenido de Geoeuskadi (Infraestructura de Datos Espaciales de Euskadi):

Sistema de Referencia	Coordenadas
ETRS89 latitud longitud	Longitud oeste: -2° 40' 15.17806" Latitud: 42° 50' 23.62928"
ETRS89 y proyección UTM Huso 30	UTM X: 526895.357 m (Huso 30) UTM Y: 4743088.406 m (Huso 30)
WGS84. latitud longitud	Longitud oeste: -2.670878 Latitud: 42.839899

Por otro lado, la forma de referenciar los distintos Sistemas de Referencia de Coordenadas es utilizar los códigos EPSG (European Petroleum Survey Group) que los codifican asignado un identificador. Todo sistema de referencia tiene su equivalencia de códigos EPSG y todos los mapas llevan asociado un código EPSG:

Código	Sistema de Referencia
EPSG:4258	Datum ETRS89 (elipsoide GRS1980), sistema de referencia empleado en la zona territorial europea.
EPSG:25830	Datum ETRS89 (Huso 30 N), en el que se encuentra la mayor parte de la península ibérica.
EPSG:4326	Datum WGS84, empleado para la representación de cartografía a nivel mundial y el utilizado por la navegación GPS.
EPSG:3857	Proyección WGS 84 / Pseudo-Mercator (Web Mercator).

A efectos prácticos, un usuario que necesita las coordenadas de una localización, por ejemplo, a través de su dispositivo móvil, resulta indistinto utilizar WGS84 o ETRS89 dado que la precisión que proporcionan ambos datums es suficiente, ya que se consideran iguales a nivel decimétrico.

5.2.2.2 Infraestructuras de Datos Espaciales (IDE)

Una IDE es un sistema informático integrado por un conjunto de recursos (catálogos, servidores, programas, aplicaciones, páginas web,...) que permite el acceso y la gestión de conjuntos de datos y servicios geográficos (descritos a través de sus metadatos), disponibles en Internet, que cumple una serie normas, estándares y especificaciones que regulan y garantizan la interoperabilidad de la información geográfica. Así mismo es necesario establecer un marco legal que asegure que los datos producidos por las instituciones serán compartidos por toda la administración y que potencie que los ciudadanos los usen.



Por ejemplo, a través de una IDE es posible combinar las parcelas catastrales del Catastro de Bizkaia, la red ferroviaria gestionada por ETS, las ortoimágenes del Sistema Cartográfico Nacional o los lugares protegidos de MITECO, entre otros servicios de datos disponibles. De este modo tenemos:

- Goeuskadi: es el geoportal de referencia de la Infraestructura de Datos Espaciales (IDE) de Euskadi con el objetivo de garantizar la reutilización y acceso fácil y eficaz de la información geográfica de la Comunidad Autónoma de Euskadi.
- B5m: la Infraestructura de Datos Espaciales de Gipuzkoa pone a la disposición del usuario una serie de conjuntos de datos geográficos para que pueda utilizarlos en sus proyectos y aplicaciones.

- GeoAraba: GeoAraba es el proyecto para la gestión de los mapas cartográficos promovido por el área de Urbanismo que pertenece a la Dirección de Ordenación del Territorio y el Centro de Cálculo de Álava (CCASA).
- GeoBizkaia: GeoBizkaia es la Infraestructura de Datos Espaciales (IDE) de Bizkaia que busca dotar de homogeneidad y transparencia al Sistema de Información Geográfica de la Diputación Foral de Bizkaia.

5.2.3 DIRECTIVA EUROPEA INSPIRE Y LA LISIGE

5.2.3.1 INSPIRE

La Directiva (Infrastructure for Spatial Information in Europe) INSPIRE es el motor para compartir recursos geográficos en Europa en forma de datos o servicios. Establece las directrices para desarrollar una Infraestructura de Información Espacial Comunitaria a partir de las IDE de los estados miembros. La Directiva describe la forma de documentar, descubrir y estandarizar datos geoespaciales y se asienta sobre dos pilares fundamentales: disponibilidad de servicios de información en base a la aplicación del estándar del dominio geoespacial del OGC y metadatos.



En España, la Ley que regula las IDE es la Ley 14/2010, sobre las infraestructuras y los servicios de información geográfica en España (LISIGE) y en su Capítulo I, artículo 3 establece que una Infraestructura de datos espaciales es:

"una estructura virtual en red integrada por datos georreferenciados y servicios interoperables de información geográfica distribuidos en diferentes sistemas de información, accesible vía Internet con un mínimo de protocolos y especificaciones normalizadas que, además de los datos, sus descripciones mediante metadatos y los servicios interoperables de información geográfica, incluya las tecnologías de búsqueda y acceso a dichos datos; las normas para su producción, gestión y difusión; los acuerdos sobre su puesta en común, acceso y utilización entre sus productores y entre éstos y los usuarios; y los mecanismos, procesos y procedimientos de coordinación y seguimiento establecidos y gestionados de conformidad con lo dispuesto en la presente ley".

5.2.3.2 Datos espaciales a nivel europeo

Una de las principales fuentes de datos a nivel europeo es el programa de observación de la Tierra de la Unión Europea, Copernicus. Este programa se ha convertido en el mayor proveedor de datos geoespaciales del mundo. Son datos obtenidos de la observación por satélite, a través de las constelaciones de satélites Sentinel y otros

satélites de terceros y datos obtenidos por sistemas de sensores in situ terrestres, aéreos y marítimos. Esta información se organiza a través de los siguientes servicios: emergencias, seguridad, vigilancia marina, vigilancia terrestre, cambio climático y vigilancia atmosférica.



El Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG) publica varios servicios de Copernicus así como las imágenes de Sentinel en los servicios de visualización WMS y WMTS del PNOA (a escalas pequeñas se visualizan las imágenes Sentinel y a escalas grandes las ortoimágenes del PNOA).

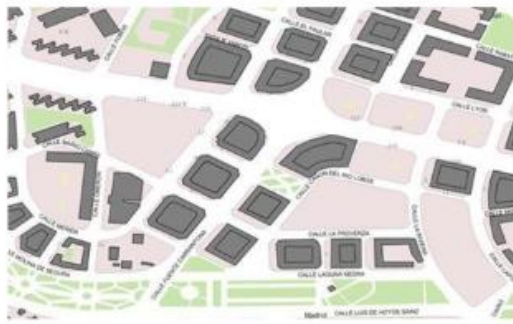
5.2.4 SERVICIOS WEB Y METADATOS

5.2.4.1 Servicios Web geográficos

La publicación estandarizada de los datos espaciales se realiza a través de servicios de visualización, descarga, cobertura o localización.

Servicios de visualización

Permiten visualizar los datos espaciales de una organización en cualquier visualizador de un ordenador o dispositivo móvil. Este tipo de servicios, conocidos como Web Map Services (WMS), originalmente basados en la especificación WMS de OGC, deben cumplir el Reglamento de Servicios de red de la Directiva INSPIRE. El WMS genera una imagen digital como una representación de la información geográfica almacenada en una base de datos, adaptada para su visualización en pantalla. Se basa en la Guía Técnica para la implementación de Servicios de Visualización INSPIRE, que a su vez se apoya en la norma ISO 19128 y en la especificación WMS de OGC.



WMS de la
D. G. de Catastro



WMS del IGN de imágenes
(ortoimágenes aéreas)

Una variante, son los servicios de visualización teselados, Web Map Tile Service, (WMTS), que dividen una sola imagen en teselas para mejorar el rendimiento, convirtiendo a este servicio más rápido y eficiente que los servicios WMS.

Servicios de descarga

Son aquellos que permitan descargar copias de conjuntos de datos espaciales, o partes de ellos y, cuando sea posible, acceder directamente a ellos. El Servicio de Descarga define las operaciones web para la consulta, acceso y edición los "objetos geográficos" (Features, en inglés) vectoriales, como por ejemplo una red de hidrografía o un determinado lago. Este tipo de servicios se conocen como Web Feature Service (WFS).

Los objetos geográficos descargables WFS pueden ser visualizados o consultados 02 directamente a través de un navegador Web o mediante una herramienta de suscripción y lectura de flujos de datos (ATOM feeds) en formato GML.

Servicios de cobertura

Web Coverage Service (WCS) permite la obtención de datos geoespaciales en forma de coberturas, es decir, información geográfica espacial digital que representa fenómenos con variación espacio-temporal.

Servicios de localización

Son aquellos que permiten la búsqueda o localización de los conjuntos de datos, series y servicios web disponibles en un catálogo. Para ello es necesario que los recursos estén descritos a través de metadatos en formato XML, al igual que la publicación de los recursos en el catálogo de datos abiertos. Este servicio se basa la especificación, Catalogue Services for the Web (CSW) de OGC.

Los servicios mencionados anteriormente se clasifican por su función, están definidos en el Reglamento de Servicios de Red de la Directiva INSPIRE y se basan en las normas ISO y en las especificaciones de OGC. El 'rincón del desarrollador' de IDEE dispone de amplia documentación en castellano sobre los servicios mencionados.

La IDEE monitoriza un amplio catálogo de servicios INSPIRE implementado a nivel nacional, organizado por Comunidades Autónomas y Organismos Públicos. La publicación de dichos servicios web geográficos se realiza mediante los siguientes recursos:

- Catálogo de la IDEE: contiene servicios provenientes de todas las organizaciones cartográficas de España.
- Catálogo Oficial de Datos y servicios INSPIRE (CODSI): contiene servicios que publican los temas requeridos y establecidos por la Directiva INSPIRE. La descripción de estos servicios se sincroniza con el catálogo de la Comisión Europea.
- Directorio de servicios de la IDEE: listado de enlaces a servicios disponibles en España.

5.3.2 SISTEMA DE REFERENCIA

Como se ha comentado, existen diferentes sistemas de referencia. En España, el sistema geodésico de referencia oficial es el ETRS89.

No obstante, WGS84 es buena opción para datos vectoriales, ya que muchas de las herramientas y aplicaciones utilizadas por los desarrolladores web están configuradas para usar datos de dispositivos móviles con GPS que utilizan WGS84. priorizados.

En el caso de imágenes ráster la opción es usar Web Mercator que tiene cobertura global, pero hay que tener en cuenta que el datum geodésico utilizado por este sistema es esférico y no es fiel a la forma de la tierra (en latitudes altas, esto produce diferencias posicionales de hasta 20 kilómetros en comparación con WGS84).

En resumen: una opción recomendable de publicación es usar la representación oficial territorial y un sistema de referencia de coordenadas global. Concretamente, por defecto: ETRS89 / EPSG:4258 y opcionalmente, para datos vectoriales: WGS84 Lat/Long (EPSG:4326) o WGS84 Lat/Long/Elevation (EPSG:4979); para datos ráster, Web Mercator (EPSG: 3857).

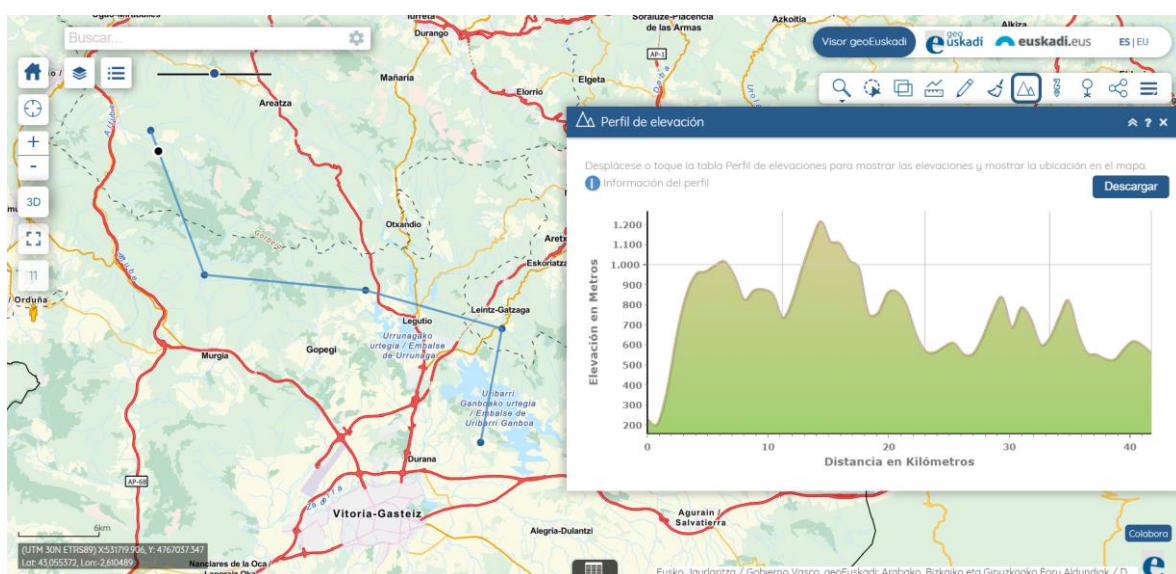
5.3.3 GEOCODIFICACIÓN DE DATOS ESPACIALES

La forma más básica y más comprensible por todos los usuarios para especificar una ubicación geográfica es utilizar una dirección postal o una tupla de coordenadas (X e Y).

Se define Geocodificación de datos al procedimiento mediante el cual un objeto geográfico recibe directa o indirectamente una etiqueta que identifica su posición espacial con respecto a algún punto común o marco de referencia.

El objetivo es que la dirección postal sea tratada como una referencia expresada utilizando coordenadas geográficas, de tal modo que una ubicación pueda indicarse en un mapa o compararse con otras ubicaciones. La geocodificación, por tanto, puede ser:

- Directa: a partir de las coordenadas (latitud y longitud) de modo que, a partir de una posición, se obtiene la dirección postal de ese punto. Por ejemplo: los móviles con GPS capturan la posición del usuario y se puede ubicar sobre un mapa.
- Indirecta: A partir de la dirección postal de un lugar, se obtienen las coordenadas de esa dirección.



Ejemplo de geolocalización de una ruta y obtención de su perfil de altitud. Aplicación de la IDE de Euskadi

Convertir direcciones geográficas en coordenadas espaciales es un proceso conocido como geocodificación. Para referir este concepto, también se utiliza el término emparejado de direcciones (address matching).

La geocodificación es una operación compleja dado que no siempre se dan las condiciones que permiten establecer correctamente el emparejamiento preciso entre dirección y coordenadas, en la mayoría de los casos porque la forma en la que se expresan las direcciones postales no es uniforme o puede ser incompleta.

El proceso que se debe llevar a cabo para una correcta geocodificación de dirección postales, implica dos pasos diferenciados:

1. Normalización de direcciones postales, que además de estructurar adecuadamente un texto, introducido en ocasiones de forma libre, vincula su contenido con un nomenclator de referencia.
2. Geocodificación de la dirección postal normalizada, que proporciona la referencia geográfica expresada mediante coordenadas espaciales.

5.3.4 INFORMACIÓN ASOCIADA Y SU ACTUALIZACIÓN

Los objetos espaciales pueden sufrir alteraciones a lo largo del tiempo. Por ejemplo, una carretera puede modificar su trazado tras realizar diferentes obras de acondicionamiento. La pauta general para los Datos Abiertos es publicar la información más reciente tan pronto como se produce, de acuerdo a la política de actualizaciones planificada.

Cuando se utilizan URIs para nombrar recursos de datos es importante valorar cuantos cambios son aceptables antes de considerar que el objeto espacial pasa a ser un objeto distinto; pensemos, por ejemplo, en la delimitación de un lago o el curso de un río. Cada uno de estos recursos tiene una URI que lo identifica unívocamente y cada uno de ellos puede experimentar cambios a lo largo del tiempo, pero en principio, siempre serán un lago y un río, por lo que su URI no tiene porqué cambiar, a no ser que se produzcan cambios sustancialmente significativos como para considerar que se trata de objetos espaciales de distinta naturaleza. En la misma línea, otros ejemplos a considerar son los límites territoriales de una ciudad o de un edificio cuyas dimensiones pueden verse alteradas tras una transformación de estructura o de un cambio de usos.

Cuando se publican datos espaciales es necesario tener en cuenta que esta información está sujeta a cambios y para ello, los metadatos del dataset juegan un papel esencial. Hay diferentes enfoques para reflejar dichos cambios:

- El enfoque más sencillo es **modificar la descripción del conjunto de datos**. En ésta se debe reflejar adecuadamente qué desencadena un cambio y si esos cambios están versionados en los metadatos, esquemas o especificaciones del conjunto de datos.
- Volver a **publicar todo el conjunto de datos con un nuevo URI**. Este enfoque permite mantener versiones anteriores del dataset de tal forma que un usuario debería poder comparar dos versiones del conjunto de datos para determinar qué ha cambiado. Es una solución simple para los publicadores de datos, pero la desventaja es que el control de cambios se transfiere al reutilizador.
- **Publicar instantáneas de los recursos que describen el objeto espacial en momentos específicos a lo largo del tiempo** y proporcionar un mecanismo para que los usuarios puedan 'navegar' entre esas instantáneas. Con este enfoque el conjunto de datos se convierte en la acumulación de estas instantáneas que los usuarios pueden explotar según sus necesidades. Es importante tener en cuenta que cada instantánea del objeto espacial se publica como un recurso separado, por tanto, esta solución es adecuada para cambios poco frecuentes de tal forma que el número de instantáneas no sea difícil de manejar.

Por último, es relevante considerar cuando un objeto espacial posee un número reducido de atributos que cambian frecuentemente. Por ejemplo, la posición GPS de una persona corriendo o cuando se transmiten datos desde un sensor que mide el nivel de agua de un depósito. En estos casos, el objeto espacial debe incluir alguna propiedad que permita registrar series temporales, es decir, una sucesión de datos medidos en determinados momentos y ordenados cronológicamente. Para ampliar información relacionada con la codificación de series temporales es recomendable revisar las siguientes especificaciones:

- **TimeseriesML para GML:** TimeseriesML 1.0 – XML Encoding of the Timeseries Profile of Observations and Measurements. James Tomkins; Dominic Lowe. OGC. 9 September 2016.
- **SensorThings API para JSON:** Una forma abierta, geoespacial y unificada para interconectar dispositivos, datos y aplicaciones de Internet de las cosas (IoT) a través de la Web: OGC ® SensorThings API Part 1: Sensing. Steve Liang; Chih-Yuan Huang; Tania Khalafbeigi. OGC. 26 July 2016. OpenGIS Implementation Standard.
- **VOCAB-DATA-CUBE:** recomendación de W3C que proporciona un mecanismo genérico para expresar datos estructurados como series de tiempo: The RDF Data Cube Vocabulary. Richard Cyganiak; Dave Reynolds. W3C. 16 January 2014.