

Trabajo Fin de Grado

INTEGRACIÓN DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG) EN LA TOPOGRAFÍA ARTILLERA APLICADOS A LA PLAZA DE CEUTA DE LOS SISTEMAS DE ARMAS DE ACA

Autor

CAC Juan Ramón Buján Hernando

Director académico: TCOL. Ignacio Ugarte Goicuría

Director militar: TTE. Ruben Hoyos Perales

Centro Universitario de la Defensa-Academia General Militar

2025



Agradecimientos

En primer lugar, deseo expresar mi más sincero agradecimiento a todos los componentes del GACA I/30 por haberme acogido y apoyado durante este corto pero bonito periodo de Prácticas Externas; y por haberme hecho sentir como en casa, ya que le guardo un especial cariño a este Regimiento desde que era solo un niño.

Además, me gustaría destacar todo el esfuerzo y dedicación por parte de mi tutor militar, el TTE D. Rubén Hoyos Perales que me ha acompañado durante mi estancia en Ceuta; así como el TTE D. Adrián González Pérez por su ayuda tanto dentro como fuera del cuartel. Extiendo mi gratitud a los cuadros de mando que han contribuido al desarrollo de este trabajo.

En el aspecto académico, quisiera agradecer a mi tutor académico, el TCOL D. Ignacio Ugarte Goicuría por toda la ayuda prestada e implicación para culminar con éxito este proyecto. Sin olvidarme de todos mis compañeros de promoción que han servido siempre de un gran respaldo emocional.

En el plano personal, no puedo dejar de reconocer el apoyo incondicional de mi familia, en especial a mis padres Juan Ramón y Mercedes; y de mis hermanas Irene y Raquel, quienes siempre han depositado en mí su confianza. También a mis amigos que me han acompañado en esta trayectoria pese a las distancias.

Por último, agradecer a mi pareja Patricia por haber estado siempre, tanto antes de entrar en la academia como durante estos cinco años, por ser siempre un pilar fundamental en mi vida.



RESUMEN

El presente Trabajo de Fin de Grado aborda la integración de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en los procedimientos topográficos de la Artillería de Campaña (ACA), aplicados a la Plaza de Ceuta. La investigación se centra en el empleo de Carta Digital como herramienta geoespacial para optimizar las labores de posicionamiento, orientación, observación y dirección de fuegos en entornos operativos complejos. Su finalidad es demostrar que la incorporación sistemática de los SIG en la topografía artillera puede incrementar la precisión, rapidez y eficiencia en la obtención y tratamiento de los datos, contribuyendo a una mayor capacidad de decisión táctica.

El estudio parte del problema detectado en las unidades artilleras: la dependencia de métodos topográficos tradicionales, validos pero limitados ante el ritmo tecnológico actual y las exigencias de interoperabilidad OTAN. Por ello, se plantea como objetivo general valorar la viabilidad y conveniencia estratégica de integrar los SIG, especialmente Carta Digital, en el marco doctrinal y operativo de la Artillería. Los objetivos específicos se orientan a analizar los métodos actuales, estudiar las herramientas geoespaciales disponibles, proponer un modelo de integración con el sistema de mando y control TALOS, y evaluar los riesgos, beneficios y necesidades formativas asociadas.

La metodología aplicada combina técnicas cualitativas y cuantitativas. Se han revisado manuales doctrinales del Ejército de Tierra, normas OTAN y publicaciones del CEGET, complementadas con entrevistas y encuestas al personal del GACA I/30. Además, se ha realizado un DAFO y un estudio de riesgos mediante la metodología AMFE para diagnosticar factores críticos y establecer propuestas de mejora.

Los resultados obtenidos confirman que los SIG, y en particular Carta Digital, constituyen una herramienta eficaz para la representación y análisis del terreno, la selección de emplazamientos y la planificación topográfica. La propuesta de integración progresiva con TALOS demuestra su factibilidad técnica en diferentes niveles (básico, intermedio y avanzado), permitiendo un flujo de información más ágil entre células topográficas y los sistemas de mando. Asimismo, el trabajo evidencia la necesidad de formación específica del personal en el uso de herramientas geoespaciales para asegurar su correcta implantación.

Como conclusión, se determina que la integración de los SIG en la topografía artillera no es solo técnicamente viable, sino estratégicamente conveniente para la modernización de los procedimientos del RAMIX-30 y la mejora de su capacidad operativa en la Plaza de Ceuta. Entre las líneas futuras destacan la realización de ejercicios piloto de interoperabilidad SIG-TALOS y el desarrollo de programas formativos específicos.

PALABRAS CLAVE

Topografía artillera, Sistemas de Información Geográfica, Carta Digital, Integración Tecnológica, Ceuta.



ABSTRACT

The present Final Degree Project focuses on the integration of Geographic Information Systems (GIS) into the topographic procedures used by Field Artillery units, specifically applied to operations within the Command Headquarters of Ceuta. The nucleus of the investigation is the use of Carta Digital as a geospatial tool to optimize positioning, orientation, observation, and fire direction tasks in complex operational environments. Its aim is to demonstrate that the systematic integration of GIS into artillery topography can enhance the accuracy, speed, and efficiency of data acquisition and processing, thereby contributing to improved tactical decision-making capabilities.

This study stems from a problem identified within artillery units: their reliance on traditional topographic methods, which, while still valid, are limited in the face of current technological advances and NATO (North Atlantic Treaty Organization) interoperability requirements. Therefore, the general objective is to assess the strategic feasibility and suitability of integrating GIS—particularly the Digital Map—into the doctrinal and operational framework of artillery. The specific objectives are aimed at analyzing current methods, studying the available geospatial tools, proposing a model of interaction with the TALOS (Light Artillery Terminal for Observation and Tracking) command and control system, and evaluating the associated risks, benefits, and training requirements.

The methodology applied combines both qualitative and quantitative techniques. Doctrinal manuals from the Spanish Army, NATO standards, and publications from CEGET (Geographic Center of the Spanish Army) have been reviewed, complemented by interviews and surveys conducted with personnel from GACA I/30. In addition, a SWOT (strengths, weaknesses, opportunities and threats) analysis and a risk assessment using the FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) methodology have been carried out to identify critical factors and develop improvement proposals.

The results obtained confirm that GIS, and particularly Carta Digital, are effective tools for terrain representation and analysis, site selection, and topographic planning. The proposed gradual integration with TALOS demonstrates its technical feasibility at various levels—basic, intermediate, and advanced—allowing for a better flow of information between topographic cells and command systems. Likewise, the study highlights the need for specific training of personnel in the use of geospatial tools to ensure their proper implementation.

In conclusion, it is determined that the integration of GIS into artillery topography is not only technically feasible but also strategically important for the modernization of RAMIX-30's procedures and the enhancement of its operational capacity in the Ceuta Garrison. Future directions include conducting pilot interoperability exercises between GIS and TALOS, as well as developing specific training programs for command staff and troops.

KEYWORDS

Topography artillery, Geographic Information Systems, Carta Digital, Technological integration, Ceuta.



INDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	I
RESUMEN	II
ABSTRACT	III
INDICE DE CONTENIDO	IV
INDICE DE FIGURAS	VI
INDICE DE TABLAS	VII
ABREVIATURAS, SIGLAS Y ACRÓNIMOS	VIII
DECLARACIÓN DE USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL	X
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 TALOS	1
2. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA	3
2.1 OBJETIVOS Y ALCANCE	3
2.2 METODOLOGÍA	4
3. ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO	5
3.1 MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS	5
3.1.1 Precisión y criterios de aplicación.	6
3.1.2 Matriz de estados/fases	6
3.2 SISTEMAS DE ARMAS ACA DEL RAMIX-30	7
3.2.1 Obús 155/52 APU – SIAC (Sistema Integrado de Artillería de Campaña)	7
3.2.2 OTO Melara Mod.56 – Obús remolcado 105/14 (M-56)	7
3.3 PECULIARIDADES OPERATIVAS - CEUTA	8
3.3.1 Logística y seguridad	8
3.4 ESTADO DEL ARTE: AVANCE EN TOPOGRAFÍA Y GEOINFORMACIÓN	9
3.5 MARCO LEGAL Y DOCTRINAL APLICABLE	10
3.5.1 Marco legal – nacional e internacional	10
3.5.2 Marco doctrinal militar aplicado a la topografía	10
3.6 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA	10
3.6.1 Definición y características	10
3.6.2 Principales SIG empleados en defensa	12
3.6.3 Carta Digital	13
3.6.4 Utilidad de los SIG en la topografía artillera	13
4 DESARROLLO: ANÁLISIS Y RESULTADOS	15
4.1 Caso de estudio 1: Asentamiento de Piezas	15
4.2 Caso de estudio 2: Observadores Avanzados (OAVs)	17
4.3 Caso de estudio 3: Zona de Aterrizaje de Helicópteros (HLZ)	19



4.4	Análisis DAFO	20
4.5	Análisis Modal de Fallos y Efectos (AMFE)	23
4.6	Análisis encuesta al personal del GACA I/30.....	24
4.7	Integración con sistemas de mando y control (TALOS).....	26
5	CONCLUSIONES	28
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	30
	ANEXOS.....	32
	ANEXO I: ENCUESTA A PERSONAL DEL GRUPO.....	32
	ANEXO II: ENTREVISTA AL CAPITÁN JIMÉNEZ.....	33



INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Ejemplo de interfaz del sistema TALOS.	2
Figura 2: Ejemplo de uso de cartografía en Carta Digital.	11
Figura 3: Ejemplo de producto cartográfico desarrollado con Carta Digital	13
Figura 4: Ejemplo de combinación de herramientas de Carta Digital.	17
Figura 5: Ejemplo de mapa de visibilidad para el OAV con Carta Digital	18
Figura 6: Ejemplo de mapa de pendientes para la elección de HLZ en Carta Digital.....	19
Figura 7: Clasificación de factores según nivel de importancia y categorías PESTEL.....	20
Figura 8: Matriz de factores del análisis DAFO	21
Figura 9: Matriz de estrategias DAFO	22
Figura 10: Matriz de factores del análisis AMFE	23
Figura 11: Diagrama de barras vertical de respuestas de la encuesta	25



INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Métodos y precisión	6
Tabla 2: Requisitos operativos	6
Tabla 3: Matriz de estados	7
Tabla 4: Especificaciones técnicas Obús 155/52 APU - SIAC	7
Tabla 5: Especificaciones técnicas OTO Melara Mod.56 – Obús Remolcado 105/14 (M-56)	8
Tabla 6: Evolución del estado del arte en topografía artillera (1990-2025)	9
Tabla 7: Principales sistemas SIG empleados en el ámbito de defensa.	12
Tabla 8: Principales aplicaciones de los SIG en la topografía artillera	15
Tabla 9: Opciones principales de la encuesta	24
Tabla 10: Niveles de integración SIG – TALOS	27



ABREVIATURAS, SIGLAS Y ACRÓNIMOS

ACA	Artillería de Campaña
APU	Unidad de Potencia Auxiliar
AMFE	Análisis Modal de Fallos y Efectos
AML	Capas Militares Adicionales
C2	Sistemas de Mando y Control
CEGET	Centro Geográfico del Ejército de Tierra
CEP	Círculo de Error Probable
DAFO	Debilidades, Amenazas, Fortalezas y Oportunidades
FDC	Centro de dirección de fuegos
GACA I/30	Grupo de Artillería de Campaña I/30
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Sistema de posicionamiento global
HLZ	Zona de Aterrizaje de Helicópteros
IA	Inteligencia artificial
ISO	Organización Internacional de Normalización
LOS	Línea de Visión
MADOC	Mando de Adiestramiento y Doctrina
MDE	Modelos Digitales de Elevación
MDS	Modelo Digital de Superficie
MDT	Modelo Digital del Terreno
MEDEVAC	Medical Evacuation
OAV	Observador Avanzado
OTAN	Organización del Tratado del Atlántico Norte
PIC	Punto de Inicialización y Control
PESTEL	Política, Económica, Sociocultural, Tecnológica, Ecológica y Lega
QGIS	Quantum Geographic Information System
RAMIX 30	Regimiento de Artillería Mixto Nº 30
RPAS	Remotely Piloted Aircraft System
RTK	Real Time Kinematic
SIAC	Sistema Integrado de Artillería de Campaña
SIG	Sistemas de Información Geográfica
SIPNAP	Sistema Integrado de Posicionamiento Navegación y Apuntamiento de
Piezas	
SIMACET	Sistema de Mando y Control del Ejército de Tierra
STANAG	Acuerdo de Normalización de la OTAN



TALOS	Terminal de Artillería para Localización y Observación del Sistema de Mando y Control de Fuegos del Ejército de Tierra
TFG	Trabajo de Fin de Grado
TS	Estación total
UAV	Vehículo aéreo no tripulado



DECLARACIÓN DE USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

En la elaboración del Trabajo de Fin de Grado *“Integración de Sistemas de Información Geográfica (SIG) a la Topografía Artillera aplicados a la Plaza de Ceuta de los Sistemas de ACA”* he utilizado de manera puntual herramientas de Inteligencia Artificial como apoyo en diferentes aspectos.

He utilizado únicamente el modelo ChatGPT-5 de la empresa OpenAI ya que integraba todo lo que necesitaba.

En primer lugar, lo utilicé al comienzo para la creación de ideas de carácter general sobre qué productos debería tener un TFG y su organización en el tiempo, pero todo el desarrollo y redacción lo realicé personalmente.

También, lo he utilizado para resumir textos y extraer las ideas clave, para ordenar alfabéticamente listas y para revisar la ortografía y la calidad de la redacción.

Cabe recalcar que, en ningún caso he compartido datos sensibles ni información confidencial con este tipo de IA extranjera, para ello solo introduje fragmentos del documento, eliminando si existiese alguna parte que incluya información sensible.



1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia militar se le ha dado gran importancia a la topografía del terreno tanto en la planificación como en la ejecución de las operaciones. Desde siglos atrás, los ejércitos han estado interesados en disponer de información precisa del terreno con el fin de poder planear operaciones, coordinar despliegues y movimientos, emplazar unidades y ejecutar con eficacia los fuegos de sus sistemas de armas. Por ello, la Artillería es una de las especialidades fundamentales más dependientes de la precisión topográfica ya que la eficacia de sus fuegos se basa en la exactitud de los cálculos y en la correcta integración de los datos del terreno.

En la actualidad, la Plaza de Ceuta es uno de los puntos estratégicos más importantes para nuestro país a nivel militar, de ahí la importancia de tener el Regimiento de Artillería Mixto nº30 (RAMIX 30). Dentro de este regimiento está encuadrado el Grupo de Artillería de Campaña I/30 (GACA I/30) que incluye dos sistemas de armas de artillería de campaña.

Los métodos y procedimientos topográficos utilizados tienen un impacto directo en la operatividad de las unidades de artillería, es por eso la importancia y la constante preocupación por encontrar soluciones que incrementen la precisión, facilite el planeamiento de las operaciones, reduzca el tiempo para el cálculo de datos y que mejore la integración con sistemas de mando y control (C2).

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son una herramienta clave como solución a estos problemas capaces de cubrir las necesidades actuales. Estos nos permiten almacenar, gestionar y analizar información espacial, facilitando la representación digital del terreno para el planeamiento, dirección y coordinación de fuegos. Con el actual desarrollo de la cartografía digital y evolución de su integración con sistemas informáticos como TALOS (Terminal de Artillería para Localización y Observación del Sistema de Mando y Control de Fuegos del Ejército de Tierra) nos abre un gran abanico de posibilidades para mejorar la manera de realizar la topografía artillera, superando y dejando atrás las limitaciones de los procedimientos tradicionales, aumentando así la eficacia operativa tanto en escenarios de instrucción, misiones internacionales o en situaciones de conflictos armados.

Este trabajo se ha centrado en la viabilidad de la integración de los SIG en la topografía artillera aplicada a la Plaza de Ceuta en los que se pone de manifiesto los procedimientos actuales y sus ineficiencias; y las posibilidades de mejora que ofrece los SIG. Para ello, se realizará un estudio en profundidad de todas las capacidades que nos ofrece los SIG, un análisis de riesgos y beneficios y una valoración de costes frente a la operatividad, con el fin de poder determinar la conveniencia de integrarlo en los sistemas de armas de ACA del RAMIX-30.

Para la correcta comprensión del estudio realizado, el contenido de este proyecto se estructura en cinco capítulos. En primer lugar, en el Capítulo I, la **Introducción**, dónde se plantea el contexto, la problemática, su importancia y relevancia. A continuación, en el Capítulo II se presentan los **Objetivos y Metodología**, que recogen las metas del trabajo y el enfoque que se ha seguido para alcanzarlas. El tercer capítulo, corresponde a los **Antecedentes y Marco teórico**, donde se analiza el estado del arte en relación con los métodos topográficos y el empleo de los SIG en el ámbito militar. El cuarto capítulo, **Desarrollo: análisis y resultados**, constituye el núcleo del trabajo, en el que se exponen las propuestas de integración y sus efectos esperados. Finalmente, en el capítulo V, de **Conclusiones**, se recogen los principales hallazgos del estudio y se plantean posibles líneas futuras de investigación y aplicación.

1.1 TALOS

El sistema TALOS es uno de los pilares para el mando y control dentro del ámbito artillero del Ejército de Tierra español. El desarrollo de este sistema informático proporciona una mejora respecto a los procedimientos analógicos y manuales; ofreciendo una gestión de datos más ágil y precisa reduciendo así los tiempos de transmisión de estos y, por ende, de las acciones de

fuego.

Reflejado en la PD3-315 Apoyos de Fuego¹, el sistema TALOS aglutina el tronco del sistema de dirección táctica y técnica del fuego, ya que permite integrar a los observadores avanzados junto a los escalones superiores de mando y a sus centros de dirección de fuegos (FDC), es decir, actúa de interfaz digital entre los elementos de adquisición de objetivos (OAVs)², los órganos de mando y los órganos de cálculo de tiro; acortando el ciclo de transmisión y toma de decisiones hasta llegar a las mismas piezas como datos técnicos de tiro.

Cabe destacar, que TALOS es capaz de funcionar en posiciones fijas, como pueden ser los puestos de mando de grupo; como en entornos móviles, centros de dirección de fuegos a nivel batería y en terminales portátiles para observadores avanzados, reflejado en la imagen ilustrada. Es por eso que se trata de un sistema muy versátil adaptable a diferentes escenarios de empleo.



Figura 1: Ejemplo de interfaz del sistema TALOS.

Fuente: Elaboración propia

¹ PD3-315: Apoyos de Fuego. Regula aspectos del empleo y coordinación del fuego.

² Observadores Avanzados



Dentro de las capacidades que nos ofrece TALOS podemos destacar: la transmisión digital de los datos de tiro, eliminando así la posibilidad de cometer algún error humano en la comunicación entre los diferentes órganos; la integración con sensores, radares de localización u observadores avanzados en tiempo real; la seguridad de sus enlaces, ya que este sistema incluye protocolos cifrados; y por último y más relevante para este proyecto, la gestión de cartografía digital, capaz de integrar mapas digitales y modelos de terrenos.

Por último, cabe destacar que TALOS no se trata de un sistema cerrado, sino que se encuentra en constante evolución y actualización. Con la incorporación de nuevas capacidades, como la utilización de vehículos aéreos no tripulados (UAVs)³ actuando de elementos de adquisición de objetivos o como la mejora de las interfaces gráficas, nos muestra el gran potencial que tiene esta plataforma que se consolida como una de las líneas de desarrollo más prometedoras.

2. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

2.1 OBJETIVOS Y ALCANCE

El objetivo general de este trabajo es analizar la viabilidad de integrar los Sistemas de Información Geográfica en la topografía artillera aplicada a la Plaza de Ceuta, con el propósito de ser capaz de determinar cómo podría afectar a la rapidez, precisión y eficacia tanto en el planeamiento como en la conducción de los procedimientos topográficos aplicados a las operaciones del GACA I/30.

Los objetivos específicos necesarios para alcanzar el objetivo final marcado son los siguientes:

- Definir y analizar los actuales métodos y procedimientos topográficos empleados en la Artillería, identificando sus limitaciones en el contexto de la Plaza de Ceuta.
- Estudiar las diferentes herramientas SIG disponibles, en especial Carta Digital y evaluar su aplicabilidad a los procesos topográficos militares.
- Articular un modelo de integración de los SIG con los sistemas de mando y control ya existentes, particularmente el sistema TALOS, con el fin de mejorar la interoperabilidad y la toma de decisiones.
- Diagnosticar los riesgos asociados a la incorporación de los SIG en la topografía artillera.

El alcance de este proyecto se limita al análisis teórico y aplicado de la integración de los SIG en la topografía artillería de la Plaza de Ceuta, sin contemplar pruebas de campo con munición real.

Este trabajo incluye: la revisión de los procedimientos topográficos tradicionales y su comparación con las capacidades de los SIG; el estudio de software y diferentes herramientas geoespaciales con posibilidad de aplicación en topografía artillera y el planteamiento de la viabilidad de la integración de los SIG con TALOS, analizando los posibles riesgos y vulnerabilidades.

Quedan expresamente fuera del alcance: la validación mediante ejercicios de fuego real o el análisis exhaustivo en temas de guerra electrónica y ciberseguridad vinculados al uso de los SIG.

³ Siglas en inglés de Unmanned Aerial Vehicle



2.2 METODOLOGÍA

La metodología de este trabajo se ha diseñado para garantizar la consecución de los objetivos marcados, se pretende combinar métodos cualitativos y cuantitativos de forma que se complementen. El empleo de ambos métodos permitiría conseguir una visión amplia pero precisa, combinando el análisis teórico con la aproximación práctica a la realidad de la topografía artillera de la Plaza de Ceuta.

- **Métodos cualitativos**

Primero se ha llevado a cabo una revisión documental y bibliográfica; el análisis de manuales doctrinales del Mando de Adiestramiento y Doctrina (MADOC), normativa cartográfica nacional, STANAG de la OTAN y referencias académicas sobre la geo información militar. Este estudio permite contextualizar el estado del arte y asentar las bases teóricas del trabajo.

Posteriormente se ha realizado entrevistas estructuradas y observaciones directas en el GACA I/30 recabando testimonios y experiencias del personal artillero perteneciente a la sección de topografía con el fin de conocer los procedimientos topográficos empleados actualmente y su percepción sobre la utilidad potencial de los SIG.

Se ha realizado un estudio de casos comparados analizando experiencias de integración de SIG en ejércitos aliados, seleccionando aquellas de mayor aplicación a la realidad de nuestro ejército.

Por último, se ha llevado a cabo un análisis estratégico cualitativo realizando un DAFO⁴ específico de la propuesta de integración, identificando fortalezas, debilidades, oportunidades y amenazas en el contexto de la Plaza de Ceuta.

- **Métodos cuantitativos**

En primer lugar, se han realizado unas encuestas al personal del GACA I/30, tanto a personal de tropa y suboficiales como a oficiales del Grupo con el fin de cuantificar el grado de conocimiento y experiencia junto a la predisposición hacia el empleo de los SIG aplicados a la topografía artillera.

Además, se ha efectuado una comparación entre los planeamientos y procedimientos topográficos tradicionales y los potenciales aportes de los SIG.

Dentro de este enfoque, se ha desarrollado un estudio de la herramienta digital Carta Digital, identificando y enumerando sus capacidades funcionales en función de su aplicabilidad técnica.

Posteriormente, se ha llevado a cabo una evaluación de riesgos mediante la herramienta AMFE (Análisis Modal de Fallos y Efectos). Con este método se pretende ponderar la gravedad, ocurrencia y detección de posibles fallos en la integración de los SIG, generando un índice de riesgo que sirve para orientar a futuras conclusiones.

En conjunto, esta metodología combina el análisis comparativo y doctrinal con la recogida de datos directos de la unidad, lo que permite abordar la problemática desde una perspectiva teórico-práctica. De este modo, los resultados no solo se fundamentan en doctrina y literatura especializada, sino también se contrasta y se combina con la experiencia y visión del personal artillero destinado en puestos tácticos de topografía, aumentando así la relevancia de las conclusiones en el entorno operativo del GACA I/30.

⁴ DAFO: Debilidades, Amenazas, Fortalezas y Oportunidades. Es una herramienta de análisis estratégico utilizada para evaluar la situación actual de una empresa, proyecto o persona, considerando tanto los factores internos (Fortalezas y Debilidades) como los externos (Oportunidades y Amenazas)



3. ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO

3.1 MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

La misión de la topografía artillera recae en asegurar el enlace de la pieza con el objetivo marcado mediante la obtención, verificación y transferencia de coordenadas, orientaciones y diferencias de cota con la precisión exigida por cada sistema de armas. Este trabajo se integra tanto en el planeamiento como en la cadena de mando. La evolución tecnológica nos exige tener que combinar métodos clásicos analíticos junto a técnicas GNSS/RTK⁵ y estaciones totales. (Ejército de Tierra, 2011)

A continuación, se van a enumerar los métodos principales en topografía artillera y su uso operativo:

GNSS (receptores GNSS/RTK)

Método utilizado preferentemente para despliegues con mayor rapidez y levantamientos en el campo. En modo RTK es capaz de proporcionar coordenadas con precisión al centímetro con la existencia de un receptor base; en modo autónomo nos ofrecería un CEP⁶ de 3-10m dependiendo del equipo y las condiciones. Este método es usado principalmente para la obtención rápida de PIC (Punto de Inicialización y Control) y para inicializar navegadores. (Ejército de Tierra, 2018)

Estación total (TS)

Su función es calcular coordenadas ponderadas a partir de diferentes referencias visibles. Lo realiza aportando medidas angulares y distancias electrónicas con alta precisión planimétrica y altimetría. Al integrarlo con GNSS (TS+RTK) nos da como resultado la combinación de rapidez y exactitud. Método recomendable cuando se desea coherencia angular y verificación cruzada.

Métodos clásicos (triangulación, poligonales, intersección y radiación)

Métodos tanto efectivos como útiles cuando GNSS falla o no se puede utilizar (interferencias, coberturas) o cuando se quiere hacer comprobaciones analíticas. Este método sigue manteniendo su importancia doctrinal por su independencia electrónica y por ser la base donde nacen los procedimientos analíticos.

Nivelación geométrica y trigonométrica

Se utiliza cuando existen diferencias de cota críticas dentro de la preparación del tiro o cuando se quiere calcular los incrementos de Z⁷. Se debe tener en cuenta la curvatura y la refracción cuando la precisión en Z es sensible.

Orientación (goniómetros, astronomía, transferencia de orientaciones)

Existen diferentes técnicas de transferencia de orientaciones: colimaciones, itinerarios, colimación al astro, referencia lejana o doble piquete. Cada uno de los métodos son esenciales cuando coexisten materiales antiguos y nuevos. (Ejército de Tierra, 2015)

⁵ RTK: Real Time Kinematic

⁶ CEP: Círculo Error Probable

⁷ Z: Es un incremento de cota.



Juan Ramón Buján Hernando

Tabla 1: Métodos y precisión

Fuente: Elaboración propia

Método	Precisión típica
GNSS autónomo	3-10 m (CEP)
GNSS RTK (base/correcciones)	Centimétrico (1-3 cm)
Estación total (TS)	Centrimétrico / decimétrico
Poligonales / Triangulación	Decímetro a métrico (dependiendo)
Nivelación geométrica	Milimétrico a centimétrico en Z

3.1.1 Precisión y criterios de aplicación.

La precisión exigida para el tiro se deriva del tamaño de la “huella” arma-munición y del objetivo. El trabajo de la topografía artillera debe garantizar que el error probable y el CEP no degraden la eficacia del tiro. Para ello, es recomendable que los PIC se levanten con precisión superior a la del dispositivo a verificar. El manual PD4-303 Procedimientos Operativos de Topografía Artillera recomienda para obuses que el error máximo asumible como referencia operativa sea 1 milésima artillera en orientación, 20m en CEP en X, Y y 10m en Z. (Ministerio de Defensa – Mando de Adiestramiento y Doctrina, 2018)

Tabla 2: Requisitos operativos

Fuente: Elaboración propia

Parámetro	Referencia operativa
Orientación (angular)	1 milésima
Posición planimétrica (X, Y)	20m CEP
Cota (Z)	10m
Mejora preferente	RTK / Estación total para PIC críticos

3.1.2 Matriz de estados/fases

La coexistencia de material antiguo junto a los nuevos métodos obliga a representar el estado topográfico mediante una herramienta llamada matriz de estados. Esta matriz incluye diferentes columnas en base a los orígenes: plano, navegador, SIPNAP (Sistema Integrado de Posicionamiento Navegación y Apuntamiento de Piezas), analítica o RTK. El objetivo para el equipo topográfico es ser capaz de desplazar la casilla del GACA hacia la esquina de mayor precisión y coherencia. (Ministerio de Defensa – Mando de Adiestramiento y Doctrina, 2018)



Juan Ramón Buján Hernando

Tabla 3: Matriz de estados

Fuente: Elaboración propia

Nivel de precisión (estado)	Navegador	SIPNAP	Analítica	RTK/Correcciones
<u>Baja</u>	Autónomo	Autónomo	Autónomo	RTK (clásico)
<u>Media</u>	Poligonal	Estación total	TS + GNSS	RTK
<u>Alta</u>	Analítica	Analítica	Analítica	RTK (verificado)
<u>Verificación</u>	Verificación	Verificación	Verificación	Consolidado
<u>Objetivo</u>	Coherencia	Coherencia	Coherencia	Óptimo

3.2 SISTEMAS DE ARMAS ACA DEL RAMIX-30

3.2.1 Obús 155/52 APU – SIAC (Sistema Integrado de Artillería de Campaña)

Se trata de la pieza de artillería de campaña de mayor calibre y alcance del GACA I/30. El SIAC es un obús de 155 mm (L/52) modernizado, con sistema auxiliar de generación eléctrica para movilidad limitada, integración de redes de mando y control y capacidad de empleo de munición asistida y guiada para misiones que exigen mayor profundidad y precisión. (Ejército de Tierra, s. f.-a)

Tabla 4: Especificaciones técnicas Obús 155/52 APU - SIAC

Fuente: Elaboración propia

Parámetro	Valor
Calibre	155 mm (L/52)
Longitud tubo	52 calibres (8.120mm)
Alcance	18km (munición convencional)
Precisión	Integrado con ordenador de tiro y sensores
Movilidad	Remolcado por VET
Empleo táctico	Fuego en profundidad y municiones guiadas

3.2.2 OTO Melara Mod.56 – Obús remolcado 105/14 (M-56)

Esta pieza se trata de un obús ligero y maniobrable, de ahí su importancia en el empleo en batería de artillería de campaña para el apoyo cercano a unidades. Tiene menor calibre y menos alcance que el SIAC, pero es compensado con mayor movilidad, rapidez de despliegue y facilidad logística. (Ejército de Tierra, s. f.-b)



Tabla 5: Especificaciones técnicas OTO Melara Mod.56 – Obús Remolcado 105/14 (M-56)

Fuente: Elaboración propia

Parámetro	Valor
Calibre	105 mm
Longitud total	3,65 m
Peso	1300 kg aprox.
Alcance	10-11 km (munición convencional)
Velocidad inicial (aprox.)	416-472 m/s (según munición)
Cadencia	Sostenida 4 rpm; máxima 6-8 rpm
Empleo táctico	Apoyo cercano, maniobras en terreno difícil

El obús 155/52 SIAC ofrece al GACA I/30 capacidad de fuego a mayor profundidad y precisión (adecuado para misiones en profundidad y para el empleo de munición asistida) mientras que el OTO Melara 105/14 (M-56) proporciona mayor movilidad y rapidez (ideal para apoyo cercano y operaciones en territorio restrictivo). El éxito recae en la combinación de ambos ya que permite al GACA I/30 ajustar su aportación táctica de fuegos en función de la misión. (Infodefensa, 2024)

3.3 PECULIARIDADES OPERATIVAS - CEUTA

La Plaza de Ceuta presenta una polaridad operativa clara: incluye zonas urbanas densas y superficies territoriales muy reducidos frente a un litoral y relieve abrupto (Monte Hacho); estas características condicionan de manera directa el empleo de la artillería y sus procedimientos topográficos. Sobre estas restricciones, la topografía artillera debe priorizar posiciones de tiro de reducido perfil, alta movilidad para remolcar las piezas, dejar mínima huella logística y trabajar sobre PICs que estén previamente verificados para acelerar la inicialización de sistemas. (Instituto Nacional de Estadística, 2024).

Estas peculiaridades, desde la perspectiva topográfica y operativa, la orografía y la concentración urbana afectan a tres dimensiones:

- **Líneas de vista (LOS) y visibilidad:** las cotas y las laderas reducen sectores de observación y obligan a seleccionar asentamientos con coberturas óptimas para observadores y sensores.
- **Ángulos y sectores de tiro:** las zonas urbanas y la presencia de población incrementan la necesidad de precisión en orientación y control de sectores de tiro seguros.
- **Estabilidad y perfil topográfico:** grandes pendientes, suelos rocosos o zonas de gran densidad urbana condicionan gravemente la selección de los asentamientos.

3.3.1 Logística y seguridad

La ciudad de Ceuta es dependiente del puerto para el suministro de material pesado y munición, es por eso por lo que la protección y continuidad de las rutas marítimas es un requisito operativo (Autoridad Portuaria de la Ciudad de Ceuta, s. f.). Además, la frontera terrestre de Marruecos añade un factor de inestabilidad, por lo que demanda una mayor coordinación y vigilancia (control de crisis, vigilancia fronteriza). En conjunto, las características de Ceuta obligan a priorizar como solución los SIG, los PICs consolidados, redundancia topográfica y procedimientos de verificación estrictos. (Reuters, 2024)



3.4 ESTADO DEL ARTE: AVANCE EN TOPOGRAFÍA Y GEOINFORMACIÓN

Con el avance tecnológico y la mejora de la digitalización de las últimas décadas, la topografía y la geoinformación⁸ se han visto afectadas en un proceso de evolución notable. Los métodos clásicos como la triangulación o la nivelación junto a los instrumentos ópticos y mecánicos ofrecían resultados fiables, pero con gran esfuerzo humano y lentitud en la ejecución, lo que limitaba la eficacia y la operatividad de las operaciones en escenarios dinámicos.

A lo largo de las últimas décadas se han desarrollado diferentes sistemas globales de navegación por satélite como el GPS, GNSS, Galileo, etc. Esto supuso un punto de inflexión en la topografía artillera gracias a la capacidad de proporcionar precisiones métricas o incluso centimétricas mediante técnicas diferenciales o RTK además de ofrecer despliegues rápidos y portabilidad. Además, paralelamente se han desarrollado estaciones totales que incluyen mediciones angulares y distancias en un mismo dispositivo, aumentando notablemente la eficiencia. Por último, técnicas más recientes como pueden ser el LIDAR⁹, la fotogrametría mediante UAVs o las imágenes vía satélites de gran resolución han abierto un gran abanico de posibilidades de observación y modelado del terreno.

Paralelamente, los SIG también se han visto involucrado en un proceso de desarrollo y evolución constante, transformando la forma de trabajar con los datos espaciales, permitiendo almacenarlos y analizarlos con diferentes bases de datos. En el ámbito militar, y más en concreto en artillería, estos avances han permitido evolucionar de cálculos manuales y analógicos a la inicialización automática de sistemas informáticos de puntería y transmisión de datos balísticos de forma más rápida y precisa junto a una mejora de la coherencia topográfica de las unidades.

En definitiva, el estado actual del arte refleja la transición en el tiempo de los métodos y procedimientos a un ecosistema digital y conectado. La clave del éxito recae en la combinación de los métodos clásicos, ya que siguen siendo imprescindibles en entornos degradados o bajo guerra electrónica, junto con las tecnológicas más avanzadas actualmente como pueden ser el GNSS, LIDAR o los SIG como Carta Digital. Todo esto supone la base para conseguir superioridad en la maniobra especialmente en escenarios singulares como es la Plaza de Ceuta. (NATO Defense College, s. f.)

Tabla 6: Evolución del estado del arte en topografía artillera (1990-2025)

Fuente: Elaboración propia

Año / Rango	Hito / Tecnología	Descripción breve	Referencias clave/Fuente
1990 – 2000	Estación total electrónica	Medición electrónica de distancias y ángulos	Manuales topográficos y doctrina
2000 – 2005	GPS → GNSS	Satelital con correcciones RTK	Normativa CEGET / PD4-303

⁸ Es la información georreferenciada (datos que tienen una ubicación en la Tierra) que se utiliza para analizar, visualizar y comprender fenómenos espaciales y tomar decisiones informadas. Se aplica en campos como la planificación territorial, la gestión de recursos, el urbanismo, la logística, el marketing y la respuesta a desastres, a menudo a través de Sistemas de Información Geográfica (SIG).

⁹ LIDAR: Light Detection And Ranging



2009 – 2015	Uso de MDT05/PNOA	Modelos Digitales del Terreno de 5m	IGN / CNIG / PNOA
2015 – 2019	Integración SIG táctica	Herramientas SIG para análisis del terreno	Publicaciones doctrinales / CEGET
2020 – 2023	Copernicus DEM GLO-30	Modelo DSM continuo con paso de 30m	Datos Copernicus
2023 - 2025	Carta Digital + flujos QGIS específicos	Integración análisis SIG	Documentos CEGET / PD internos

3.5 MARCO LEGAL Y DOCTRINAL APLICABLE

3.5.1. Marco legal – nacional e internacional

La base legal que regula las funciones, competencias y organización de las Fuerzas Armadas en España radica en la Ley Orgánica de Defensa Nacional¹⁰ y su desarrollo estatuario. Estas normas son las que definen el marco del uso de los recursos militares, obligaciones de defensa y los límites de las competencias aplicables a las actividades como la topografía militar. A nivel operativo también es regulado por normas internas del Ministerio de Defensa y los reglamentos que definen la clasificación, tratamiento y difusión de información y cartografía militar. (Ministerio de Defensa / SAPROMIL, s. f.)

En el ámbito internacional, la OTAN es la responsable de dictar los estándares y perfiles de interoperabilidad geoespacial con el objetivo de poder garantizar que los datos topográficos sean interoperables entre aliados en operaciones conjuntas/combinadas. (NATO Standardization Office, 2019)

3.5.2. Marco doctrinal militar aplicado a la topografía

La doctrina española de adiestramiento y procedimientos operativos actúa como referencia de obligado cumplimiento para las técnicas topográficas empleadas en artillería. Los manuales del MADOC y más en particular el PD4-303 Procedimientos Operativos de Topografía Artillera, establecen los procedimientos a seguir, los niveles de precisión exigibles, las fases operativas como la planificación, levantamiento, verificación y mantenimiento de coherencia; y la necesidad de redundancia de materiales y procedimientos ante escenarios degradados (GNSS/RTK, estación total, métodos clásicos). Además, la normativa militar establece ciertos requisitos para la protección de información clasificada y medidas de seguridad a la hora de generar y difundir productos topográficos. (Ministerio de Defensa – Gobierno de España, s. f.)

3.6 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

3.6.1 Definición y características

El Sistema de Información Geográfica es un conjunto que integra datos geoespaciales, hardware, software, procedimientos y personal con la misión de capturar, almacenar, gestionar, analizar y representar información referenciada espacialmente a través de normas ISO aplicables

¹⁰ Ley Orgánica de Defensa Nacional 5/2005 que regula la defensa nacional y establece las bases de la organización militar conforme a los principios que establece la Constitución.

y productos del CEGET. Los SIG realizan una combinación de atributos alfanuméricos con geometría, tanto vectorial como ráster,¹¹ con el fin de producir productos cartográficos y análisis operativos reproducibles. (Burrough & McDonell, 1998)

- **Datos:** incluye vectores (puntos, líneas, polígonos), ráster (ortofotos, modelos digitales de elevación) y productos derivados (curvas de nivel, MDT, nubes de puntos LIDAR)
- **Software:** entre ellos destacan los motores de los SIG, visores, librerías de análisis espacial y gestores de bases de datos geoespaciales.
- **Hardware:** estaciones de trabajo, servidores geoespaciales, dispositivos móviles y sensores (GNSS, RPAS, LIDAR).
- **Procedimientos y personal:** se incluyen los flujos de trabajo para la ingesta de datos, control de calidad y metadatos normalizados que garantizan la trazabilidad y aptitud operacional.

Los SIG permiten ejecutar modelos métricos (cálculos de diferencia de cota, análisis de visibilidad...), gestionar diferentes versiones de la carta digital y generar productos interoperables para C2 y sistemas balísticos como TALOS. (Longley, Goodchild, Maguire & Rhind, 2025)

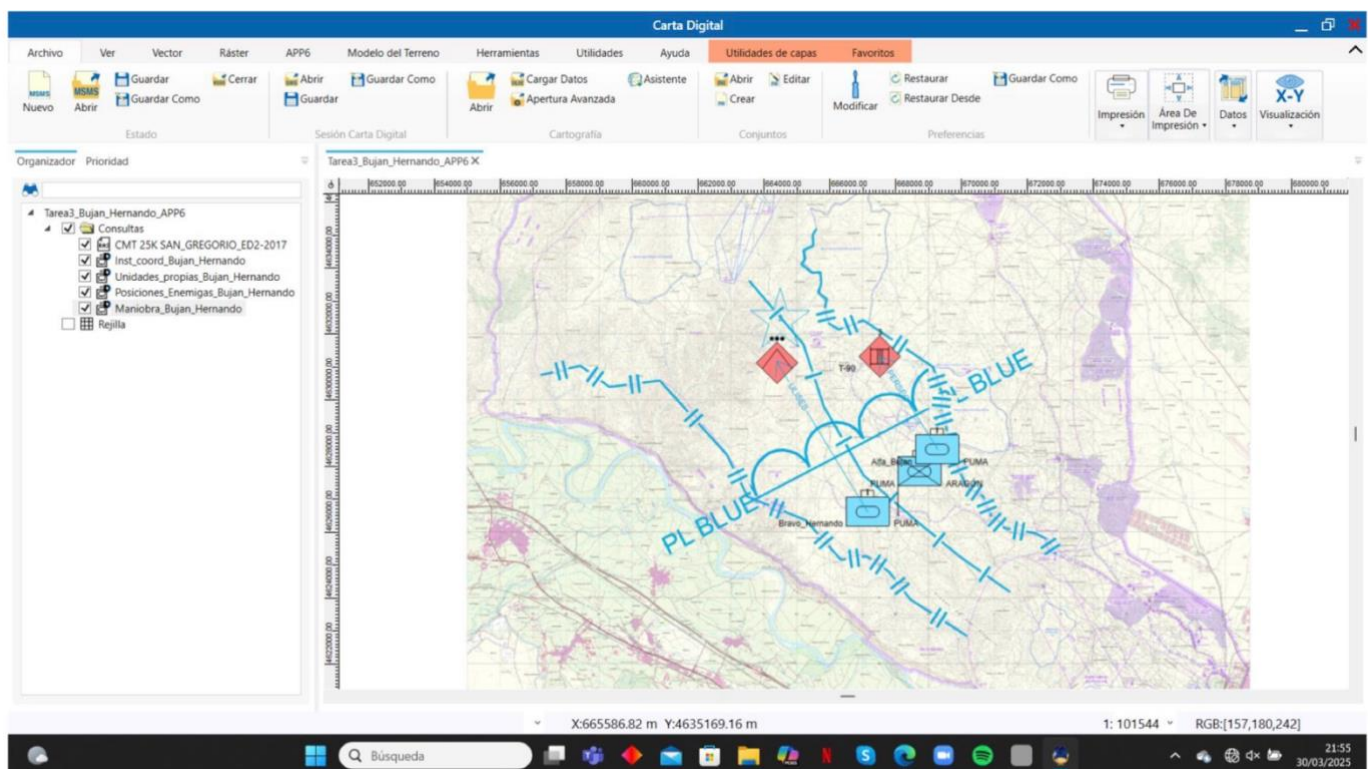


Figura 2: Ejemplo de uso de cartografía en Carta Digital.

Fuente: Elaboración propia

¹¹ Estructura de datos que representa una imagen como una cuadrícula de píxeles (o celdas). Cada píxel contiene un valor numérico que representa información específica, como color, temperatura o elevación.



3.6.2 Principales SIG empleados en defensa

En zonas de operaciones y entornos militares se emplean soluciones comerciales, de código abierto y productos o formatos normalizados para poder garantizar la interoperabilidad OTAN:

- ArcGIS: se trata de una plataforma con potentes herramientas de análisis, edición y publicación. Es frecuente su uso en entornos donde se requiere gran integración con sistemas institucionales. (Esri, s. f.)
- QGIS: se trata de una alternativa de código abierto, ligera y entendible. Esta plataforma es útil para despliegues donde se prioriza independencia tecnológica y rapidez en la producción cartográfica necesaria. (QGIS.org, s. f.)
- Estándares OTAN y capas militares (AML / STANAG): se tratan de formatos y capas que aseguran la homogeneidad de datos en operaciones multinacionales.
- Sistemas nacionales (CEGET / Ministerio de Defensa): se tratan de productos oficiales como Carta Digital militar, redes geodésicas y metadatos que sirven de referencia doctrinal y técnica para las unidades.

La elección entre las soluciones numeradas anteriormente dependerá de los requisitos de seguridad, conectividad y capacidad de integración TALOS / C2. En la siguiente tabla se muestra un esquema de los sistemas, así como sus naturalezas, características principales y usos en defensa. (NATO, 2015)

Tabla 7: Principales sistemas SIG empleados en el ámbito de defensa.

Fuente: Elaboración propia

SISTEMA	NATURALEZA	CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES	USO EN DEFENSA
ArcGIS (Esri)	Comercial	Elevada capacidad de análisis, interoperabilidad con formatos OTAN	Células GEO, MADOC, CEGET y unidades planeamiento
QGIS	Código abierto	Ligero, extensible y gratuito; compatible con complementos militares	Unidades tácticas, análisis rápidos y producción cartográfica en el campo
STANAG / AML / NISP	Estándares OTAN	Define formatos, simbología y capas militares	Operaciones combinadas OTAN
Sistemas CEGET / MINISDEF	Nacional	Producción de cartografía oficial y Carta Digital	Referencia geoespacial para unidades ET



3.6.3 Carta Digital

La Carta Digital es la representación cartográfica militar oficial en formato digital, la cual ha sustituido a la cartografía analógica en procesos operativos. Debe cumplir criterios de calidad, metadatos y formatos interoperables, es decir, compatibles con STANAG aplicables. (United States Army, 2010). Esta plataforma incluye diferentes elementos claves:

- **Capas temáticas:** red geodésica, MDE / MDE derivadas, curvas de nivel, hidrografía, vías, edificaciones y elementos de interés militar.
- **Modelos digitales de elevación (MDE):** son esenciales para cálculos altimétricos, perfiles de terreno y análisis LOS
- **Metadatos y control de calidad:** versión, fecha de adquisición y actualización, fuente y precisión, los cuales permiten verificar la idoneidad del producto para la misión asignada.
- **Interoperabilidad:** es capaz de integrarse con sistemas de mando y control (C2/TALOS), con herramientas de cálculos balístico y topográfico (SIPNAP, estaciones totales).

En artillería, la Carta Digital incluye un gran abanico de recursos y herramientas como inicializar piezas u observadores, definir posiciones de tiro y PIC, etc. (Ministerio de Defensa-Ejército de Tierra, s. f.-a)



Figura 3: Ejemplo de producto cartográfico desarrollado con Carta Digital

Fuente: Elaboración propia

3.6.4 Utilidad de los SIG en la topografía artillera

Los SIG constituyen el pilar fundamental de la coherencia topográfica y la precisión balística en la artillería moderna. La aplicación de estos sistemas abarca tanto la fase inicial de planeamiento como la ejecución y dirección del fuego. A continuación, se van a enumerar las utilidades más destacadas agrupadas en diferentes ámbitos:



- **Determinación y gestión de coordenadas:** permiten obtener, verificar, almacenar coordenadas precisas de posiciones de fuego, observadores, objetivos y puntos de referencia. Estos SIG junto a la combinación con GNSS/RTK y estaciones totales, nos permite garantizar una precisión con un error de centímetros en la georreferenciación de los diferentes elementos del sistema de armas de ACA.
- **Análisis de visibilidad:** estos se consiguen a partir de los MDE; el operador es capaz de calcular la visibilidad desde observatorios o sensores, mejorando así la colocación de equipos y detectando posibles zonas ciegas o cubiertas por el relieve a tener en cuenta. Esta herramienta es esencial en entornos urbanos o accidentados, como puede ser el ejemplo de Ceuta.
- **Cálculo de diferencias de cota e incrementos en Z:** permiten extraer perfiles altimétricos entre la pieza y el objetivo a batir, generando así diferencias de cota que se usan para los cálculos balísticos. Gracias a esta automatización, se reducen los errores humanos y acelera la preparación para el fuego.
- **Planificación de sectores de tiro y zonas de seguridad:** con la superposición de capas temáticas nos permite marcar sectores de tiro seguros, excluir zonas urbanas o con infraestructuras críticas. Además, se puede modelar áreas de dispersión, zonas prohibidas o restringidas.
- **Control de precisión y verificación topográfica:** sirve como detector de errores o desviaciones topográficas mediante la comparación entre coordenadas GNSS, puntos de red y referencias del CEGET. Gracias a la verificación, asegura que todos los sistemas trabajen sobre un mismo marco geodésico.
- **Modelado del terreno y simulación balística:** gracias a la posibilidad de integrar los modelos digitales con aplicación de simulación como puede ser TALOS, nos permite reproducir el comportamiento del proyectil teniendo en cuenta diferentes cuestiones como puede ser el relieve, el viento y los obstáculos. Esto refuerza la seguridad del tiro indirecto.
- **Apoyo logístico y despliegue:** dentro de las capacidades de los SIG, una muy frecuente es para el uso de selección de itinerarios para el transporte de piezas y munición, pudiendo identificar las zonas con pendientes máximas, zonas inundables, zonas con vegetación, etc.
- **Actualización dinámica mediante sensores:** con el empleo de UAV o sensores LIDAR o incluso imágenes satélites nos permitiría actualizar la base cartográfica en tiempo casi real, incluyendo modificaciones del terreno durante la operación debido a construcciones recientes o daños de combate.
- **Integraciones con sistemas de mando y control:** los SIG permiten enviar y recibir coordenadas, polígonos o rutas directamente a los sistemas C2 como pueden ser TALOS o SIMACET¹², asegurando así la coherencia espacial entre los diferentes escalones de mando y las unidades de fuego. (Ministerio de Defensa – Ejército de Tierra, s. f.-b)

¹² Es una herramienta informática utilizada para la gestión y planificación de operaciones militares. Este sistema permite a los mandos coordinar y conducir actividades tácticas a través de una red de nodos autónomos, gestionando datos e intercambiando información de forma eficiente



Tabla 8: Principales aplicaciones de los SIG en la topografía artillera

Fuente: Elaboración propia

APLICACIÓN	UTILIDAD OPERATIVA	NIVEL DE EMPLEO
Determinación de coordenadas	Precisión en objetivos y posiciones	Sección topografía
Análisis de visibilidad (LOS)	Elección de emplazamientos óptimos	OAV
Cálculos de incrementos Z	Integración automática en tiro	FDC
Control de precisión topográfica	Verificación GNSS / CEGET	Sección topografía
Simulación balística sobre MDE	Evaluación del terreno real	Planeamiento GACA
Planeamiento logístico	Optimización de rutas y despliegues	Planeamiento GACA
Actualización cartografía	Reducción desfase relación terreno-real	RAMIX-30 / CEGET
Sectores de tiro seguros	Minimización de daños colaterales	GACA
Integración C2 / TALOS	Sincronización de información y fluidez	Todos los niveles de mando

4 DESARROLLO: ANÁLISIS Y RESULTADOS

4.1 Caso de estudio 1: Asentamiento de Piezas

El correcto asentamiento de las piezas de artillería constituye una de las fases más críticas dentro de la preparación topográfica de una operación de fuego. La elección de la posición condiciona directamente la precisión, seguridad y eficacia del tiro, así como la supervivencia de la unidad en el campo de batalla. En la Plaza de Ceuta, la compleja orografía, los desniveles abruptos y la limitada superficie útil representan factores restrictivos que obligan a analizar minuciosamente cada emplazamiento antes de su ocupación. La topografía del terreno, la accesibilidad de los itinerarios, la estabilidad del suelo, la visibilidad y los sectores de tiro son variables determinantes a la hora de ejecutar una acción de fuego. Tradicionalmente, estas decisiones se tomaban sobre cartas analógicas y con la observación directa sobre el terreno, lo que introducía riesgo de error humano y una pérdida de tiempo considerable. Por ello, la implementación de herramientas digitales basadas en SIG, como Carta Digital, ofrece una solución precisa, reproducible y visualmente integrada para la selección y evaluación de asentamientos artilleros.



Entre las herramientas que Carta Digital pone a disposición de personal topográfico para la preparación artillera y planeamiento, destacan las siguientes:

- **Análisis de pendientes:** permite generar mapas de inclinación del terreno a partir del Modelo Digital de Elevación (MDE), identificando áreas planas aptas para el asentamiento de piezas y descartando aquellas con pendientes excesivas que dificulten la nivelación. Su uso garantiza una mejora en la estabilidad y en la seguridad del tiro, además de reducir el tiempo de preparación de la posición por parte del personal de topografía.
- **Análisis de accesibilidad y viabilidad de rutas:** a partir de capas temáticas de vías, suelos y vegetación, se pueden calcular itinerarios óptimos para el remolque o despliegue de obuses, evitando zonas con pendientes pronunciadas, terrenos blandos o inaccesibles para camiones. Esto contribuye a un planeamiento logístico más eficiente y a minimizar riesgos durante las marchas y cambios de asentamiento.
- **Identificación de zonas rocosas o con vegetación densa:** mediante la superposición de capas temáticas se pueden excluir áreas inadecuadas para el asentamiento, evitando suelos inestables o con vegetación que impida el despliegue. Esta herramienta optimiza la selección de posiciones artilleras seguras.
- **Análisis de visibilidad:** calcula zonas vistas y ocultas desde un punto determinado (ya sea desde la posición para hacer fuego o desde una posible posición enemiga). Permite garantizar que las piezas se encuentren en una posición protegida, pero con visibilidad suficiente hacia las zonas de coordinación. En Ceuta, donde abundan las colinas y elevaciones, esta herramienta evita emplazamientos ciegos y mejora la coordinación con el Puesto de Mando (PC) y los OAVs.
- **Modelado de alturas de vegetación y obstáculos:** gracias al Modelo Digital de Superficie (MDS), es posible simular la altura real de los obstáculos (bosques, edificaciones, relieves) para valorar su influencia en el tiro y en la ocultación. Esta funcionalidad ayuda a equilibrar la protección visual del asentamiento con la libertad de sector de la trayectoria balística.
- **Cálculo de distancias a zonas logísticas o de abastecimiento:** mediante la herramienta de análisis de proximidad, permite medir la distancia entre cada posición potencial y los puntos logísticos del Grupo, como municionamiento, repostaje, reabastecimiento. Esto permite priorizar y filtrar posiciones que reduzcan el esfuerzo logístico y faciliten la continuidad del fuego.
- **Delimitación de zonas de caída y márgenes de seguridad:** se pueden crear áreas de fuego restringido o prohibido; además de crear perímetros de Zona de Caída de Projectiles (ZCP) e incluso añadir cierto margen de seguridad para no batir objetivos que estén demasiado cerca del límite de la zona de caída de proyectiles. Esta consulta es fundamental para garantizar la seguridad de las acciones de fuego y evitar daños colaterales a zonas pobladas o infraestructuras críticas.

Combinando los resultados anteriores (pendiente, visibilidad, accesibilidad y distancia logística), se puede generar un mapa de “aptitud de asentamientos” que muestre por capas, de forma visual las zonas óptimas para el despliegue de piezas según los criterios definidos por el usuario, sintetizando toda la información espacial y facilitando la toma de decisiones. Es por eso, que la aplicación combinada de todas estas herramientas y consultas posibles a crear a gusto del usuario; permite transformar el proceso tradicional de planeamiento en un procedimiento digitalizado, rápido y verificable. Carta Digital es capaz de proporcionar una base geoespacial unificada sobre la que el personal de topografía puede simular, comparar y validar diferentes ubicaciones antes del despliegue real. De esta forma, el GACA I/30 obtendría una notable reducción en los tiempos de planeamiento y una mejora en la seguridad de las acciones de fuego y supervivencia de la unidad.

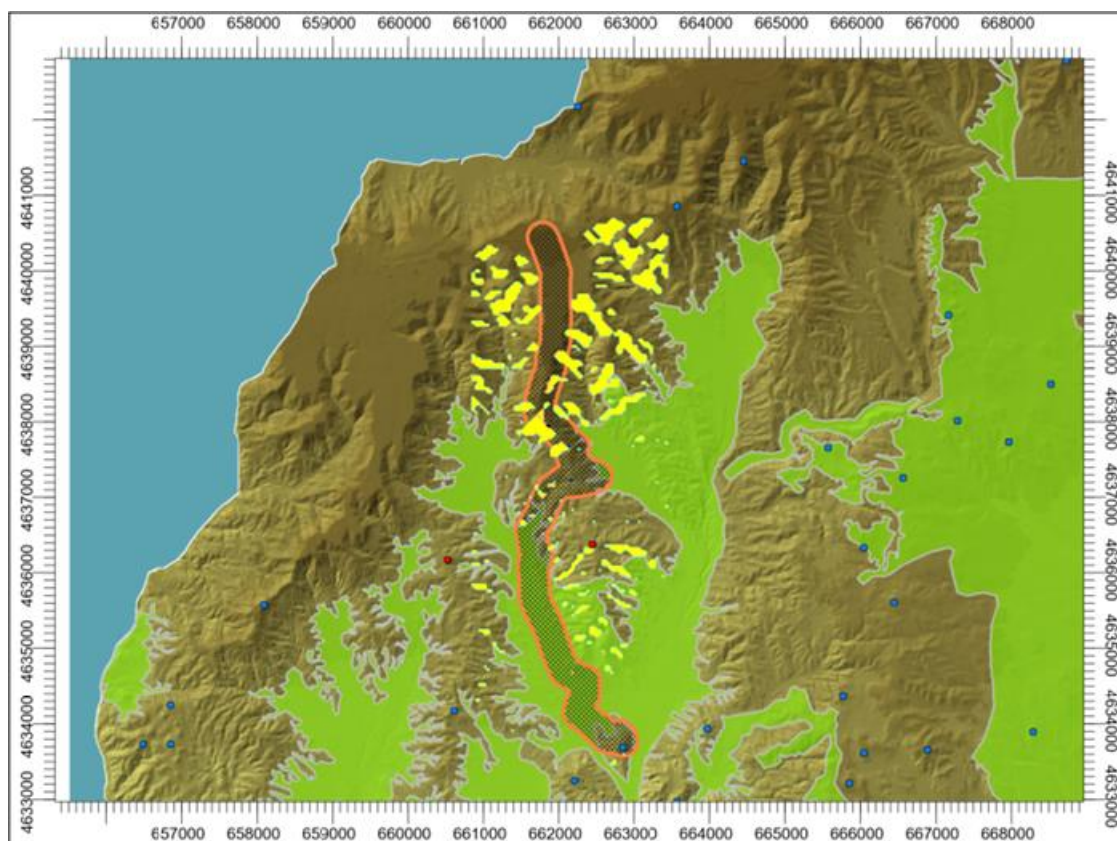


Figura 4: Ejemplo de combinación de herramientas de Carta Digital.

Fuente: Elaboración propia

4.2 Caso de estudio 2: Observadores Avanzados (OAVs)

La determinación de puntos de observación óptimos para los OAVs es una tarea crítica que condiciona directamente al levantamiento de blancos, la corrección del tiro y la supervivencia del propio observador. En la Plaza de Ceuta, la orografía accidentada, la presencia de elevaciones cercanas y la heterogeneidad de la cobertura vegetal son condicionantes a tener en cuenta a la hora de elegir un observatorio. Además, la altitud relativa respecto al objetivo, las cotas intermedias y la accesibilidad para el despliegue y evacuación son variantes operativas que deben valorarse de forma conjunta a la hora de la toma de decisiones. Tradicionalmente, la selección se basaba en cartografía analógica, observación directa y experiencia local. Gracias a la aplicación de los SIG, más en concreto a Carta Digital, permite sistematizar y cuantificar los factores relevantes para la selección de los observatorios con un criterio reproducible y verificable.

Las herramientas y consultas aplicables desde Carta Digital útiles para la selección de observatorios son las siguientes (algunas repetidas del caso anterior, pero con un objetivo diferente):

- **Análisis de visibilidad:** calcula las áreas del terreno que son visibles desde un punto determinado, permitiendo priorizar observatorios que maximicen la cobertura visual y minimicen los puntos ciegos. De esta forma el OAV podrá situarse con rapidez en observatorios que le permitan cumplir su misión como levantar objetivos o corregir el tiro.
- **Línea de visibilidad entre puntos:** permite evaluar la visibilidad directa entre el

observador y los objetivos, agrupando los objetivos visibles de cada OAV y combinándolo con los demás, identificando así si hay algún objetivo no visible.

- **Altitud relativa y perfiles altimétricos:** a partir del MDE se extraen perfiles entre el observatorio y los objetivos, analizando las diferencias de cota y pendientes. Esto permite garantizar que la elección del observatorio maximiza el alcance visual y reduce obstrucciones.
- **Análisis de vegetación y cobertura:** empleando MDS se puede estimar la presencia, altura y densidad de vegetación u otros obstáculos que puedan interferir con la observación directa del observador y el objetivo. Esto evita posiciones que aparentemente dominan el terreno, pero en realidad están parcialmente cegadas por copas de árboles u otros obstáculos.
- **Mapas de accesibilidad y rutas:** con la combinación de vías, carreteras y pendientes se calculan rutas seguras y tiempos de acceso o repliegue para el OAV. Esto asegura que la posición elegida es alcanzable y que existe una ruta de retirada en caso de contingencia.

Con la combinación de las capas anteriores (visibilidad, altitud relativa, vegetación, accesibilidad) se puede generar un índice de idoneidad para la selección de observatorios según la misión y los criterios ponderados por la unidad.

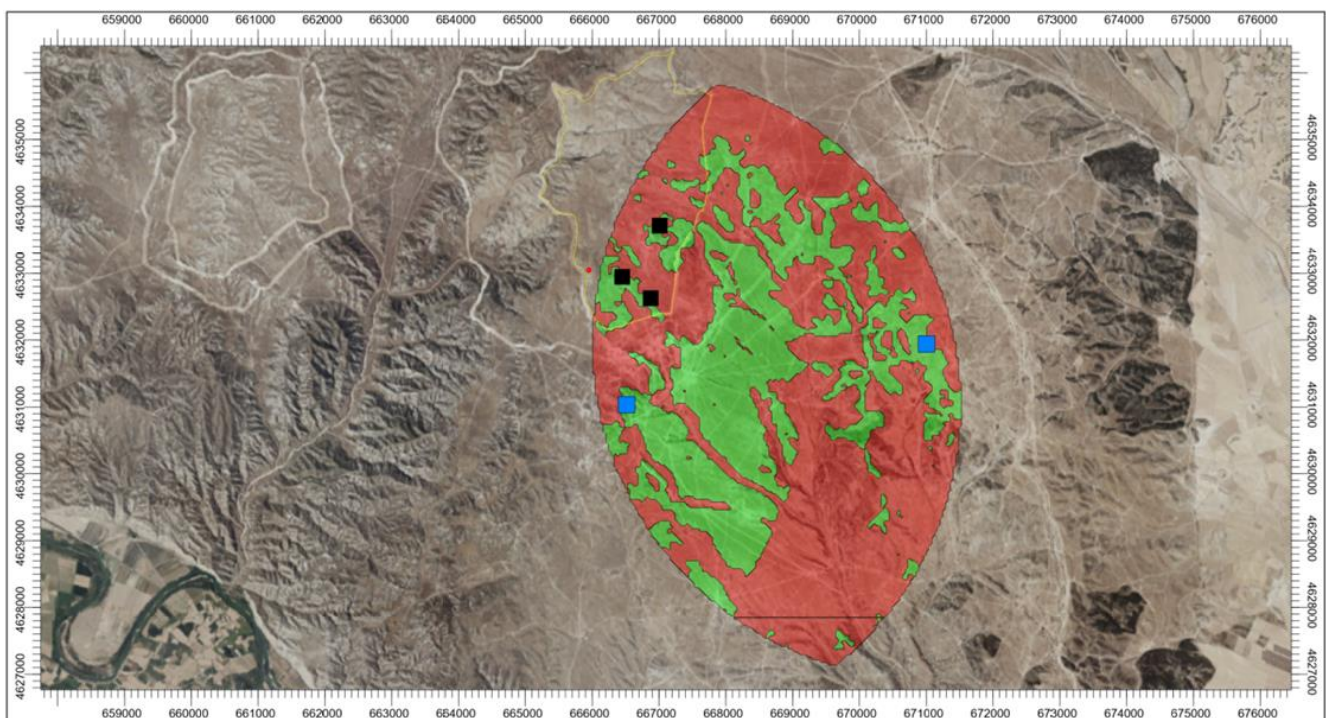


Figura 5: Ejemplo de mapa de visibilidad para el OAV con Carta Digital

Fuente: Elaboración propia

En esta figura podemos observar el mapa de visibilidad conjunta de los dos observadores (marcados con un cuadrado azul), en el que las áreas rojas son las zonas ocultas y las áreas verdes son las zonas visibles. Los cuadrados negros son los objetivos, que como se puede observar, están dentro del área verde, por lo cual la elección de los observatorios permitirá que los observadores sean capaces de levantar los objetivos y corregir el tiro.



4.3 Caso de estudio 3: Zona de Aterrizaje de Helicópteros (HLZ)

La selección de zonas aptas para el aterrizaje de helicópteros (HLZ) es una tarea de alta responsabilidad. En operaciones artilleras, los HLZ pueden emplearse para el transporte de personal, munición o evacuación sanitaria (MEDEVAC), siendo determinante su ubicación en relación con las piezas, los observadores y las rutas logísticas, además de tener en cuenta pasillos aéreos que se sincronicen con los sectores de tiro de las piezas. En el entorno de Ceuta, el relieve abrupto, la densidad urbana y la limitada extensión de superficie disponible complican notablemente la identificación de áreas adecuadas para el aterrizaje seguro. La pendiente del terreno, la presencia de obstáculos naturales o artificiales, la vegetación y accesibilidad son factores que deben evaluarse con precisión antes de la designación de un HLZ. Tradicionalmente, esta selección se realizaba con cartografía analógica y de forma visual, pero gracias a la introducción de los SIG, como Carta Digital, permite un análisis detallado del terreno reduciendo así riesgos.

Análisis de pendiente: a partir del MDE se calcula la inclinación media del terreno expresada en grados o porcentaje. Para operaciones con helicópteros, se considera que una pendiente inferior a 7° (aproximadamente 12%) es óptima para el aterrizaje, mientras que valores superiores incrementan el riesgo de vuelco o contacto de rotor. Este análisis permite descartar automáticamente áreas no viables y destacar las superficies planas o aptas para el aterrizaje, garantizando así la seguridad durante la maniobra de toma y reduciendo el tiempo necesario para el reconocimiento previo.

Análisis de cobertura del suelo: esta herramienta identifica el tipo de superficie y su densidad: roca, vegetación, asfalto, agua, terreno mixto, etc. Permite excluir zonas con vegetación alta o suelos inestables, priorizando así superficies firmes y despejadas.

Detección de obstáculos: con el MDS se puede simular la altura real de elementos verticales como arboles o torres, pudiendo establecer corredores seguros de aproximación y despegue.

Análisis de accesibilidad: empleando diferentes capas de vías y caminos, se calculan rutas de aproximación terrestre para personal y vehículos.

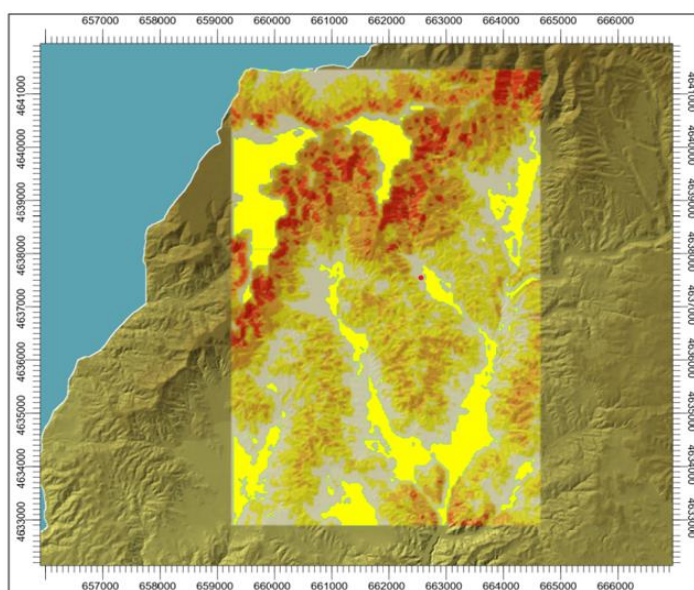


Figura 6: Ejemplo de mapa de pendientes para la elección de HLZ en Carta Digital

Fuente: Elaboración propia

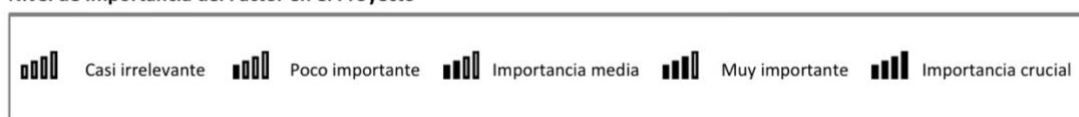


4.4 Análisis DAFO

El análisis DAFO es una herramienta para el diagnóstico estratégico el cual permite identificar los factores tanto internos como externos que podrían condicionar la implantación de los SIG a la topografía artillera. La aplicación de esta herramienta en este trabajo tiene por objeto estudiar la viabilidad, limitaciones y potencial de la integración de herramientas SIG, especialmente Carta Digital, en el contexto operativo de la Plaza de Ceuta.

El procedimiento de elaboración se ha basado en la identificación de factores internos, en los que se incluye las fortalezas y debilidades; y externos en los que encontramos las oportunidades y amenazas, además de valorar el nivel de importancia y su impacto en el proyecto. Para la clasificación y análisis de forma estructurada, se ha asociado cada factor a categorías PESTEL (Política, Económica, Sociocultural, Tecnológica, Ecológica y Legal).

Nivel de Importancia del Factor en el Proyecto



Categorías PESTEL



Figura 7: Clasificación de factores según nivel de importancia y categorías PESTEL.

Fuente: Elaboración propia a partir de la página <https://dafo.ipyme.org>

Debilidades

Entre las principales debilidades detectadas nos encontramos la ausencia de protocolos estandarizados para el empleo de Carta Digital en topografía artillera y la limitada formación avanzada en SIG en el personal del GACA I/30. Además, a ello se le suma la escasez de tiempo operativo para la capacitación y formación de diferentes prestaciones de los SIG. Estos factores reflejan la necesidad de consolidar procedimientos, formación y medios para garantizar un uso homogéneo y eficiente de las capacidades SIG en la unidad.

Amenazas

El entorno operativo presenta ciertos riesgos asociados a la ciberseguridad y la posible intrusión en sistemas conectados a la red, además de la dependencia tecnológica de software y servidores externos. Asimismo, se identifican limitaciones de conectividad en zonas boscosas y la potencial obsolescencia del hardware militar frente al avance del sector civil, lo que exige una actualización constante del material y medidas de protección digital.

Fortalezas

Las fortalezas se basan en la existencia de productos geográficos oficiales de alta calidad, como la Carta Digital Militar; los MDE y las capas temáticas del CEGET, que cuentan con el apoyo institucional del Ejército de Tierra al desarrollo SIG y la capacidad de adaptación del personal artillero a nuevas tecnologías. También incluye la posibilidad de integración con sistemas C2 y TALOS, lo que aumenta el potencial operativo de los datos geoespaciales en la cadena de fuego.



Oportunidades

El avance de la interoperabilidad OTAN mediante estándares STANAG y diferentes capas militares adicionales (AML) junto a la cooperación con CEGET y otras unidades geográficas, constituye una gran oportunidad para optimizar la gestión y actualización de información geoespacial. Además, la aplicación de los SIG en la instrucción miliar y ejercicios de adiestramiento contribuye a reducir tiempos de despliegue y aumentar la precisión y eficacia del tiro.

DAFO: Integración de Sistemas de Información Geográfica (SIG) en la Topografía Artillera del RAMIX-30 (Plaza de Ceuta)

Descripción del DAFO: *Análisis DAFO orientado a identificar las fortalezas, debilidades, oportunidades y amenazas vinculadas a la implementación de herramientas SIG —principalmente Carta Digital— en los procesos topográficos y de adquisición de datos del Grupo de Artillería de Campaña I/30 (RAMIX-30). Este análisis perm*

Matriz de factores

 Debilidades	 Amenazas
 Ausencia de protocolos estandarizados de uso de Carta Digital en el flujo topográfico.	  Limitaciones de conectividad y cobertura en entornos de campaña o montaña.
 Limitada formación avanzada en SIG entre el personal del RAMIX-30.	  Ciberseguridad y riesgo de intrusión en sistemas SIG conectados a red.
 Escasez de tiempo operativo para capacitación y práctica en SIG.	  Dependencia tecnológica de software o servidores externos (CEGET, Esri, etc.).
 Dependencia de equipos informáticos con prestaciones limitadas en campaña.	  Posible obsolescencia de hardware militar frente a la evolución SIG civil.
 Fortalezas	 Oportunidades
 Disponibilidad de productos geográficos oficiales (Carta Digital CEGET, MDE, capas temáticas).	  Avance de la interoperabilidad OTAN mediante estándares STANAG y AML.
 Apoyo institucional y doctrinal al desarrollo SIG dentro del ET y CEGET.	  Mayor cooperación con CEGET y otras unidades para actualización de datos geoespaciales.
 Capacidad del personal artillero para adaptarse a nuevas herramientas tecnológicas	  Aplicación de herramientas SIG a la formación militar y ejercicios combinados.
 Integración potencial con sistemas de mando y control (TALOS).	  Posibilidad de reducir tiempos de despliegue y aumentar precisión en el tiro.

Figura 8: Matriz de factores del análisis DAFO

Fuente: Elaboración propia a partir de la página <https://dafo.ipyme.org>

Con la combinación de estos factores se derivan las siguientes estrategias:

- **Estrategia ofensiva:** Integración progresiva SIG-TALOS para el planeamiento del fuego.
- **Estrategia defensiva:** Modernización de equipos y mantenimiento preventivo del hardware SIG.
- **Estrategia adaptativa:** Programa de instrucción SIG y cooperación con CEGET.
- **Estrategia de supervivencia:** Estandarización del uso de Carta Digital y medidas de seguridad.



Matriz de estrategias



Figura 9: Matriz de estrategias DAFO

Fuente: Elaboración propia a partir de la página <https://dafo.ipyme.org>

Estas estrategias combinan fortalezas y oportunidades para potenciar la eficiencia operativa, a la vez que son capaces de mitigar las debilidades y amenazas mediante acciones formativas, tecnológicas y doctrinales. El resultado refleja un escenario favorable para la implantación progresiva de los SIG en la topografía artillera, siempre que se acompañe de inversión en formación, estandarización y una adecuada protección de la información.



4.5 Análisis Modal de Fallos y Efectos (AMFE)

El AMFE (Análisis Modal de Fallos y Efectos) es una herramienta de gestión del riesgo empleada con el fin de detectar, evaluar y priorizar los posibles fallos que puedan ocurrir en un proceso o sistema antes de que se presenten. Su aplicación tiene como finalidad ser capaz de minimizar los efectos de los posibles errores mediante la aplicación de medidas preventivas. En el ámbito militar, esta metodología permite mejorar tanto en el planeamiento como en la exactitud de la información topográfica.

En este trabajo, el AMFE se aplica a la obtención, gestión, tratamiento y la transmisión de datos geográficos dentro del GACA I/30, considerando la integración progresiva de los SIG, especialmente Carta Digital. El objetivo principal es identificar los puntos críticos en el flujo de información geoespacial, analizando el impacto y la posibilidad de ocurrencia para ser capaces de priorizar acciones de mejora.

En el método AMFE se valoran tres parámetros:

- Severidad (S): mide la magnitud de las consecuencias que tendría un fallo si llegase a ocurrirse
- Ocurrencia (O): estima la posibilidad de que pueda aparecer el fallo
- Detección (D): valora la posibilidad de que el fallo sea identificado antes de que se produzca un efecto adverso.

De la combinación de estos tres valores se obtiene un Número de Prioridad de Riesgo (RPN), que se calcula de la siguiente manera: $RPN = S \times O \times D$

Este índice permite establecer un orden coherente de prioridad de los fallos y así determinar las medidas preventivas más adecuadas en función de su criticidad.

En la siguiente tabla se muestran los principales modos de fallos identificados en el proceso topográfico artillero con SIG, junto a su posible causa y efecto, su valoración y una propuesta de acción preventiva.

ANÁLISIS MODAL DE FALLOS Y EFECTOS (AMFE)

Nº	Modo de fallo	Causa	Efecto	S	O	D	RPN	Acción correctiva o preventiva
1	Error en levantamiento GNSS	Falta de calibración o señal inestable	Coordenadas erróneas en los puntos de inicialización (PIC)	9	5	4	180	Verificar la calibración del receptor y establecer puntos de control redundantes.
2	Interpretación incorrecta de pendientes o cotas en Carta Digital	Falta de formación en análisis SIG	Asentamiento en terreno no apto o con riesgo de error de tiro	8	6	5	240	Reforzar la instrucción SIG y validar los resultados mediante análisis multicriterio.
3	Desactualización del Modelo Digital de Elevaciones (MDE)	Falta de sincronización con bases CEGET	Cotas imprecisas que afectan al cálculo balístico	8	3	3	72	Actualizar periódicamente los datos MDE y verificar la fecha de origen.
4	Pérdida de datos geoespaciales	Fallo informático, eléctrico o humano	Repetición de levantamientos o pérdida de trazabilidad	7	4	5	140	Implementar copias de seguridad automáticas y protocolos de almacenamiento seguro.
5	Error en la transferencia de datos a TALOS	Incompatibilidad de formato o fallo de red	Datos no integrables en el sistema de mando y control	9	3	3	81	Convertir los archivos a formatos STANAG y validar su integridad antes del envío.

Figura 10: Matriz de factores del análisis AMFE

Fuente: Elaboración propia

Del análisis anterior se puede observar que los modos de fallo con mayor riesgo potencial serían la interpretación incorrecta de los datos topográficos en Carta Digital con un RPN de 240 y la obtención incorrecta de coordenadas GNSS con un RPN de 180. Ambos están directamente relacionados con la formación del personal y la verificación técnica de los instrumentos de medición, lo que refuerza la necesidad de fortalecer las competencias en el empleo de los SIG.



Los fallos relacionados con la desactualización de datos o la incompatibilidad de formatos presentan una posibilidad menor de ocurrencia, aunque su impacto en la operatividad puede ser significativo si no se tienen en cuenta medidas adecuadas. De esta forma, la actualización periódica de productos CEGET, la estandarización de formatos y la implantación de medidas de almacenamiento seguro de datos son acciones recomendadas para reducir el riesgo global.

La aplicación del AMFE al proceso topográfico permite establecer un marco de mejora para el empleo e los SIG dentro del GACA I/30, favoreciendo la detección temprana de errores y garantizando una mayor fiabilidad en la información geoespacial empleada.

4.6 Análisis encuesta al personal del GACA I/30.

Con el fin de cuantificar el grado de conocimiento y la predisposición del personal del Grupo sobre la utilización e integración de los SIG, y más en concreto de la herramienta Carta Digital, en diferentes labores de topografía artillera, se ha diseñado una encuesta de preguntas cerradas. El cuestionario (Anexo I) consta de nueve preguntas enfocadas hacia: el conocimiento general sobre los SIG, experiencia previa con aplicaciones cartográficas, valoración de la importancia de la topografía en el planeamiento, suficiencia de métodos actuales, funcionalidades de Carta Digital de mayor interés, necesidad de información específica, predisposición al uso y a la asistencia de formación necesaria para su uso, además de señalar diferentes barreras percibidas para su integración.

La encuesta se difundió en formato papel durante la tercera semana de septiembre. El personal objetivo fue todo el personal perteneciente al GACA I/30, incluyendo personal de tropa, suboficiales y oficiales. La muestra empleada para ejemplificar el tratamiento estadístico es de 72 respuestas.

Las respuestas se han codificado de forma nominal y se han calculado frecuencias absolutas y porcentajes por opción. Para la presentación gráfica se han utilizado diagramas de barras verticales y tablas resumen. En la siguiente tabla se muestran la respuesta con mayor porcentaje de elección.

Tabla 9: Opciones principales de la encuesta

Fuente: Elaboración propia

Pregunta	Opción principal
Q1. ¿Conoce qué son los SIG?	Sí
Q2. Experiencia previa en aplicaciones cartográficas	No
Q3. ¿Considera la topografía decisiva?	Sí, mucho
Q4. ¿Métodos topográficos actuales suficientes?	Parcialmente
Q5. ¿En qué puede mejorar la unidad gracias a Carta Digital?	Precisión de los datos
Q6. ¿Qué funcionalidad resulta más útil?	Cálculo de pendientes y accesibilidad
Q7. ¿Necesidad de información específica al personal?	Sí, muy necesaria
Q8. Predisposición a usar Carta Digital	Alta
Q9. Barrera principal	Falta de formación



Nivel de conocimiento y experiencia

Aunque la mayoría declara conocer qué son los SIG, la experiencia habiendo utilizado estas herramientas digitales es baja: la respuesta más frecuente en la pregunta sobre el uso real de las aplicaciones cartográficas fue "No" (58%). Esto sugiere que el conocimiento teórico existe pero falta la aplicación práctica, así como la falta de formación y entrenamiento en herramientas concretas como Carta Digital.

Relevancia de la topografía

Más de la mitad de la muestra considera que la topografía es un factor decisivo en el planeamiento (56%). Esto refuerza la importancia de integrar los SIG en procedimientos topográficos artilleros.

Suficiencia de métodos actuales

Una proporción significativa considera los métodos actuales solo parcialmente suficientes (42%). Esto abre una oportunidad clara para proponer mejoras basadas en SIG.

Funcionalidades demandadas y principales barreras.

Las funcionalidades más valoradas son: precisión de los datos y cálculo de pendientes y accesibilidad, seguidas de visibilidad y perfiles topográficos. La barrera principal señalada es la falta de formación (49%). Por tanto, la propuesta de integración debería incluir un plan de formación y una evaluación de capacidades técnicas.

Predisposición al cambio

Existe una predisposición favorable, alrededor de un 42% de predisposición alta y un 37% de predisposición media. Esto nos indica que, con la formación y el apoyo técnico correcto, la adopción de Carta Digital sería viable.

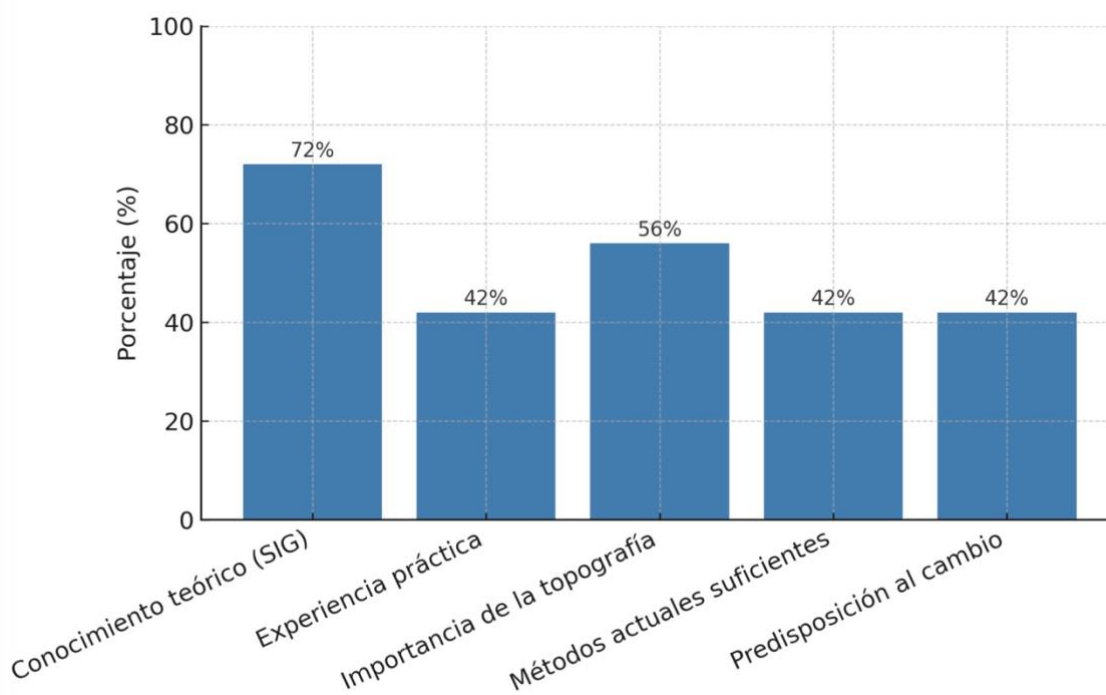


Figura 11: Diagrama de barras vertical de respuestas de la encuesta

Fuente: Elaboración propia



4.7 Integración con sistemas de mando y control (TALOS).

Actualmente, los SIG empleados en la topografía y el sistema de mando y control TALOS operan de forma paralela, sin una conexión directa entre ambos. Los productos geoespaciales generados por el personal topográfico como pueden ser coordenadas UTM, análisis de visibilidad, pendientes, áreas aptas para despliegue; se transfieren mediante procedimientos manuales o archivos intermedios, lo que limita la inmediatez y la coherencia en la información compartida. Ante esta situación, se plantea un modelo de integración progresivo que facilite el intercambio automatizado de datos, optimizando la comunicación entre el equipo topográfico y el entorno C2 del sistema TALOS.

Flujos de información entre sistemas

La interoperabilidad entre los entornos SIG y TALOS se fundamenta en tres tipos principales de información:

- Datos posicionales: coordenadas de las piezas, OAVs, objetivos y PICs.
- Capas geoespaciales: MDE, análisis de visibilidad, pendientes, cobertura y accesibilidad.
- Datos operativos: resultados derivados de los análisis topográficos con aplicación directa en el planeamiento de fuegos, despliegue y movilidad.

Estos flujos permitirían una retroalimentación continua entre el análisis del terreno y la toma de decisiones táctica, facilitando la actualización automática de capas y posiciones en tiempo real.

Consideraciones técnicas y doctrinales

La interoperabilidad entre SIG y TALOS debe respetar los principios de seguridad y clasificación de la información, así como los estándares OTAN y la normativa nacional sobre intercambio geoespacial. Asimismo, las modificaciones de flujo de información deberán ajustarse a los procedimientos doctrinales vigentes de apoyo de fuegos (PD3-315) y de topografía artillera (PD4-303 y PD4-318), garantizando que la integración tecnológica no interfiera con la cadena de mando ni con los protocolos operativos establecidos

Niveles propuestos de integración

La integración entre Carta Digital y TALOS puede abordarse en distintos grados de complejidad técnica, de acuerdo con las necesidades y recursos de la unidad:

- Integridad básica: consiste en la exportación e importación manual de capas o coordenadas mediante formatos estándar (SHP, KML, GPX). Es una solución inmediata y de bajo coste que mejora la precisión y homogeneidad de la información sin requerir modificaciones en el sistema.
- Integridad intermedia: plantea la existencia de una base de datos geográfica compartida o un middleware que sincronice automáticamente capas y posiciones actualizadas, permitiendo la visualización simultánea en ambos entornos.
- Integración avanzada: implica la interoperabilidad directa en tiempo real conforme a los estándares OTAN de intercambio de datos geoespaciales (STANAG 7170 y 7074), de modo que los análisis topográficos realizados con Carta Digital se reflejen instantáneamente en TALOS y viceversa, integrando al completo el entorno SIG en el sistema C2.

Cada nivel de integración presenta distintos requerimientos técnicos, logísticos y de seguridad, pero todos contribuyen a reducir la carga de trabajo manual y los riesgos por descoordinación entre topografía y mando y control.



Tabla 10: Niveles de integración SIG – TALOS

Fuente: Elaboración propia

Nivel de integración	Descripción operativa	Ventajas principales	Limitaciones o riesgos	Requisitos técnicos y de personal
Básico	Intercambio manual de información entre Carta Digital y TALOS	Fácil implementación, bajo coste, mejora precisión y coherencia de los datos	Dependencia del factor humano, riesgo de errores de transcripción.	Personal con conocimientos básicos en SIG
Intermedio	Sincronización semiautomática mediante base de datos compartida	Actualización de capas en tiempo casi real, mayor fluidez a la toma de decisiones	Requiere infraestructura de red segura y mantenimiento técnico	Instalación de base de datos o servidor compartido. Formación técnica específica
Avanzado	Interoperabilidad completa en tiempo real conforme a estándares OTAN	Actualización instantánea de datos topográficos y tácticos	Alta complejidad técnica, coste elevado, dependencia de sistemas externos	Hardware y software interoperables. Personal cualificado

Requisitos de personal y formación

El éxito de esta integración no depende únicamente de la infraestructura técnica, sino de la capacitación del personal. Por ello, se proponen las siguientes acciones formativas y organizativas a nivel de instrucción:

- Formación específica en uso avanzado de SIG y análisis geoespacial para el personal topográfico y de observación
- Instrucción básica en lectura e interpretación de productos SIG para operadores TALOS.
- Ejercicios conjuntos entre el personal de topografía, los observadores y la célula C2, orientados a validar el flujo de datos en escenarios simulados y a homogeneizar procedimientos.
- Inclusión de contenidos sobre interoperabilidad SIG en los planes de instrucción y adiestramiento del GACA I/30.

La conexión progresiva entre los SIG y el sistema TALOS representa una oportunidad tangible para modernizar los procesos topográficos y de mando y control del RAMIX-30. Su aplicación gradual, empezando por los niveles básico e intermedio, permitiría reducir tiempos, minimizar errores y mejorar la coordinación de la unidad. A medio plazo, la integración avanzada supondría un paso decisivo hacia un entorno operativo geoespacial unificado, donde la información topográfica y táctica se gestione en tiempo real, potenciando la eficacia del apoyo de fuegos y la capacidad de acción de la unidad.



5 CONCLUSIONES

El presente trabajo ha permitido analizar en profundidad la viabilidad y las ventajas derivadas de la integración de los SIG, y en particular de la Carta Digital, en los procedimientos topográficos aplicados a la ACA del RAMIX-30 en la Plaza de Ceuta. A lo largo de la investigación se ha demostrado que la aplicación sistemática de herramientas SIG mejora de forma notable la precisión, rapidez y seguridad en las operaciones de adquisición de datos constituyendo un recurso de gran valor para el planeamiento, la toma de decisiones y el adiestramiento.

En relación con el **primer objetivo**, se ha definido y analizado el estado actual de los métodos y procedimientos topográficos empleados en el GACA I/30, identificando tanto sus fortalezas (fiabilidad, estandarización y disciplina operativa), como sus limitaciones derivadas del uso de técnicas manuales y dependientes del terreno. El estudio confirma que los métodos tradicionales siguen siendo válidos en contextos de baja conectividad o escaso apoyo tecnológico, pero su complementariedad con los SIG permitiría una notable optimización de tiempos, reducción de errores humanos y mayor interoperabilidad entre unidades.

Respecto al **segundo objetivo**, el trabajo ha permitido estudiar las principales herramientas SIG disponibles y su aplicación a la topografía artillera, comparando soluciones comerciales (ArcGIS, QGIS) y productos institucionales (Carta Digital del CEGET). La evolución demuestra que la Carta Digital constituye la opción más adecuada para entornos militares por su carácter oficial, compatibilidad con los estándares OTAN (STANAG y AML) y por su capacidad de operar en redes cerradas. Su uso en combinación con MDE, MDS y análisis de visibilidad y pendientes ofrece un apoyo directo al estudio topográfico y a la selección de posiciones artilleras, observatorios y HLZs.

En cuanto al **tercer objetivo**, se ha propuesto un modelo de integración funcional entre los SIG y el sistema de mando y control TALOS, planteando tres niveles de integración (básico, intermedio y avanzado). De dicho análisis se concluye que, aunque la conexión directa todavía presenta barreras técnicas y de seguridad de red, la interoperabilidad parcial mediante exportación de capas y modelos constituye una vía viable y progresiva para mejorar el flujo de información topográfica dentro de la cadena de fuego.

En relación con el **cuarto objetivo**, el diagnóstico de riesgos realizado mediante las metodologías DAFO y AMFE ha permitido identificar las principales amenazas (falta de formación técnica, limitaciones de hardware y dependencia de conectividad) y establecer medidas preventivas y correctoras realistas. Entre ellas destacan la necesidad de formación específica del personal en SIG, la incorporación progresiva de equipos compatibles y la consolidación de protocolos de seguridad de la información.

Con relación a la evaluación global del **objetivo general**, centrado en la valoración global del modelo propuesto, confirma que la integración de los SIG en la topografía artillera no es solo técnicamente viable, sino estratégica y operativamente conveniente. La implantación de este modelo mejoraría la capacidad de planeamiento, ejecución y evaluación de las misiones, optimizando los recursos disponibles y aumentando la autonomía del GACA I/30 en operaciones.

Como continuación del presente estudio, se propone ampliar la investigación hacia **tres ejes principales**:

- La integración práctica de los productos SIG con sistema TALOS mediante pruebas piloto en ejercicios, evaluando tiempos de respuesta y precisión de los datos.
- El desarrollo de módulos formativos específicos de Carta Digital y análisis geoespacial aplicados a Artillería, para que el personal adquiera competencias operativas en el uso de estas herramientas.
- La futura conexión de la red topográfica con sistemas de observación y con sensores UAV, lo que permitiría generar productos topográficos en tiempo real y reforzar la conciencia situacional de las unidades, sin depender de cartografía preexistente.



En conclusión, este Trabajo de Fin de Grado demuestra que la aplicación de los SIG a la topografía artillera representa una oportunidad tangible para modernizar los procedimientos, reforzar la interoperabilidad y aumentar la eficacia de las operaciones en el ámbito artillero. Su progresiva implantación en la Plaza de Ceuta podría situar al RAMIX-30 como referencia en la integración de geoinformación dentro del sistema de apoyos de fuegos del Ejército de Tierra.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Autoridad Portuaria de la Ciudad de Ceuta. (s. f.). *Home / Port of Ceuta*. Disponible en: <https://www.puertodeceuta.com/en/home>

Burrough, P. A., & McDonell, R. A. (1998). *Principles of geographical information systems*. Oxford University Press.

Ejército de Tierra. (2011). PD4-318. *Procedimientos operativos de FDC (Tomo I y II)*. Granada: Mando de Adiestramiento y Doctrina (MADOC).

Ejército de Tierra. (2015). PD3-315. *Apoyos de fuego*. Granada: Mando de Adiestramiento y Doctrina (MADOC).

Ejército de Tierra. (2018). PD4-304. *Empleo de la artillería de campaña*. Granada: Mando de Adiestramiento y Doctrina (MADOC).

Ejército de Tierra. (s. f.). *Comandancia General de Ceuta — Organización*. Ministerio de Defensa. Disponible en: https://ejercito.defensa.gob.es/unidades/Ceuta/comge_ceuta/Organizacion/index.html

Ejército de Tierra. (s. f.). *Materiales — Página principal (sección Materiales / Armamento)*. Ministerio de Defensa. Disponible en: <https://ejercito.defensa.gob.es/materiales/index.html>

Ejército de Tierra. (s. f.). *Obús 155/52 SIAC*. Ministerio de Defensa. Disponible en: https://ejercito.defensa.gob.es/materiales/Armamento_pesado_veh_combate/siac.html

Ejército de Tierra. (s. f.). *Obús remolcado 105/14 OTO Melara M-56*. Ministerio de Defensa. Disponible en: https://ejercito.defensa.gob.es/materiales/Armamento_pesado_veh_combate/obus_remolcado_oto_melara.html

Ejército de Tierra. (s. f.). *Regimiento Mixto de Artillería n.º 30 (RAMIX-30) — Organización / Localización*. Ministerio de Defensa. Disponible en: <https://ejercito.defensa.gob.es/unidades/Ceuta/ramix30/Organizacion/index.html>

Esri. (s. f.). *ArcGIS — Defense and intelligence*. Disponible en: <https://www.esri.com/en-us/industries/defense/overview>

Infodefensa. (2024, 9 de marzo). *Santa Bárbara Sistemas entrega los primeros obuses 155/52 modernizados al Ejército de Tierra*. Disponible en: <https://www.infodefensa.com/texto-diario/mostrar/4750336/santa-barbara-sistemas-entrega-tierra-primeros-obuses-155-52-modernizados>

Instituto Nacional de Estadística (INE). (2024). *Cifras oficiales de población: Ceuta*. Disponible en: <https://www.ine.es>

Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. (2015). *Geographic information science and systems*. Chichester: Wiley.

Ministerio de Defensa — Ejército de Tierra. (s. f.). *Centro Geográfico del Ejército (CEGET)*. Disponible en: <https://ejercito.defensa.gob.es/unidades/Madrid/ceget>

Ministerio de Defensa — Ejército de Tierra. (s. f.). *Materiales y cartografía digital para defensa*. Disponible en: <https://ejercito.defensa.gob.es/materiales>

Ministerio de Defensa — Gobierno de España. (s. f.). *Ley Orgánica 5/2005, de 17 de noviembre, de la Defensa Nacional (texto consolidado)*. Boletín Oficial del Estado. Disponible en: <https://www.boe.es>

Ministerio de Defensa — Mando de Adiestramiento y Doctrina. (2018). *Procedimientos operativos de topografía artillera (PD4-303) [Manual doctrinal]*. Madrid: Ministerio de Defensa.

Ministerio de Defensa / SAPROMIL. (s. f.). *Legislación y normativa de defensa*. Disponible en: <https://www.defensa.gob.es/sapromil/legislacion>

NATO. (2015). *STANAG 7170 — Additional Military Layers (AML) Digital Geospatial Data Products (Ed. 3) / NISP (NATO Interoperability Standards and Profiles)*. Disponible en: <https://nisp.nw3.dk>



NATO Defense College. (s. f.). *Topographic maps: The scientific principles of their content and military topography*. Disponible en: <https://www.ndc.nato.int/topographic-maps-the-scientific-principles-of-their-content-and-military-topography>

NATO Standardization Office. (2019). *ATP-3.3.2.2: Artillery procedures*. Bruselas: NATO.

QGIS.org. (s. f.). *QGIS: A free and open-source geographic information system*. Disponible en: <https://qgis.org>

Reuters. (2024, 20 de septiembre). *Morocco arrests 152 people for allegedly inciting illegal migration to Ceuta*. Disponible en: <https://www.reuters.com/world/africa/morocco-arrests-152-people-allegedly-inciting-illegal-migration-ceuta-2024-09-20>

Santa Bárbara Sistemas / General Dynamics European Land Systems. (s. f.). *Santa Bárbara Sistemas — Obús 155/52 (SIAC) [Ficha técnica / nota de prensa]*. Disponible en: <https://www.gdels.com>

United States Army. (2010). *FM 3-09: Field artillery operations and fire support*. Washington, D.C.: Headquarters, Department of the Army.



ANEXOS

Anexo I: Encuesta a personal del Grupo.

Con el fin de cuantificar el grado de conocimiento y experiencia del personal del GACA I/30 junto a su predisposición hacia el empleo e integración de los SIG, más en concreto la herramienta de Carta Digital, en la topografía artillera.

1. ¿Conoce usted qué son los Sistemas de Información Geográfica?
-Sí / No / Algo
2. ¿Ha tenido alguna experiencia previa en el uso de aplicaciones cartográficas digitales (como Carta Digital, Google Earth, QGIS, etc)?
-Sí frecuente / Sí ocasional / No
3. ¿Considera que la topografía es un factor decisivo en el planeamiento de operaciones artilleras en la Plaza de Ceuta?
-Sí, mucho / Sí, en parte / Poco / Nada
4. ¿Cree que los métodos topográficos actuales del grupo son suficientes para satisfacer las necesidades tácticas?
-Sí, totalmente / Parcialmente / No
5. ¿En qué aspectos cree que un SIG como Carta Digital podría mejorar el trabajo de la unidad?
-Rapidez en el planeamiento / Precisión de los datos / Facilidad para compartir / Otros (sin especificar)
6. ¿Qué funcionalidades le parecen más útiles para el planeamiento artillero en Ceuta?
Cálculo de pendientes y accesibilidad / Visibilidad desde puntos concretos / Cobertura de vegetación y ocultación / Perfiles topográficos / Otros (sin especificar)
7. ¿Considera necesario recibir información específica en Carta Digital para el personal del grupo?
Sí, muy necesaria / Sí, algo necesaria / Poco necesaria / Nada necesaria
8. ¿Qué grado de predisposición tendría usted para emplear habitualmente herramientas digitales como Carta Digital en su trabajo diario?
Alta / Media / Baja / Nula
9. En su opinión, ¿qué barreras principales dificultarían la integración de Carta Digital en la unidad?
Falta de formación / Limitaciones técnicas / Resistencia al cambio / Otro (sin especificar)



Anexo II: Entrevista al Capitán Jiménez

Con el fin de conocer los procedimientos topográficos empleados actualmente y su percepción sobre la utilidad potencial de los SIG.

1. Cuáles son los procedimientos topográficos que emplea actualmente el GACA I/30 para el desarrollo de sus operaciones
2. Desde su experiencia, cuáles son las principales limitaciones de los métodos tradicionales
3. Qué productos topográficos resultan más útiles en la preparación de un despliegue artillero.
4. Qué dificultades prácticas encuentran para ingresar esos productos en el planeamiento y conducción de las operaciones
5. Considera que una herramienta como Carta Digital podría solventar parte de esas limitaciones
6. Qué requisitos cree que serían necesarios para incorporar Carta Digital de manera efectiva a la topografía artillera.
7. En qué medida considera que el empleo de Carta Digital podría acelerar o mejorar la calidad del planeamiento y conducción en comparación con los métodos tradicionales
8. Qué impacto cree que tendría a medio plazo la integración de Carta Digital.