



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Selección de emplazamiento óptimo de una base militar mediante
sistemas de información geográfica*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Rafael Guerra Albarracín

DIRECTORES: Andrés Suárez García

Miguel Ángel Álvarez Feijóo

CURSO ACADÉMICO: 2017-2018

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Selección de emplazamiento óptimo de una base militar mediante
sistemas de información geográfica*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

Universida_deVigo

RESUMEN

Durante el desarrollo de cualquier operación militar, tanto en el extranjero como en territorio nacional, es de vital importancia la localización de la base militar desde donde se ejecuten dichas operaciones. Debido a esto, durante en el estudio del planeamiento de dicha base militar, entran en juego numerosos factores que han de ser tratado. Las principales herramientas de las que se disponen son los sistemas de información geográfica (SIG), que permiten el análisis de una alta cantidad de datos de manera sencilla y de forma muy gráfica, permitiendo numerosas operaciones con respecto al estudio de la localización de una base militar. Durante este trabajo, se ha estudiado el empleo de las técnicas SIG para optimizar la selección de alternativas para el emplazamiento de una base militar dentro de un territorio en concreto, en función de unos parámetros específicos. Además, se ha comprobado la flexibilidad de dichas técnicas, proponiendo diversos casos estudios, variando la importancia y pesos de cada parámetro en función del tipo de base militar especificado.

PALABRAS CLAVE

SIG, base militar, emplazamiento, análisis multicriterio, proceso de análisis jerárquico

AGRADECIMIENTOS

A mis tutores, D. Andrés Suárez García y D. Miguel Ángel Álvarez Feijóo, por su ayuda constante a lo largo de todo este proyecto y por ayudarme a conseguir sacar este trabajo adelante.

A mis compañeros de camareta, por soportar mis pequeños ataques de ira cuando las cosas no salían bien.

Y por último, a todas aquellas personas que me han ayudado a lo largo de estos cinco años en la Escuela Naval Militar.

CONTENIDO

Contenido	5
Índice de Figuras	8
Índice de Tablas.....	11
1 Introducción y objetivos	13
1.1 Motivación	13
1.2 Objetivos	14
1.3 Metodología	14
1.4 Estructura del trabajo	15
2 Estado del arte	17
2.1 Introducción	17
2.2 Sistemas de Información Geográfica	18
2.2.1 Definición	18
2.2.2 Representación de datos	19
2.3 Métodos de Análisis Multicriterio	23
2.3.1 Introducción	23
2.3.2 Proceso de Análisis Jerárquico	24
2.4 Aplicaciones Militares	25
2.4.1 Gestión del Patrimonio de Defensa	25
2.4.2 Evaluación del Terreno	25
2.4.3 Operaciones Navales	26
2.5 Programas SIG	27
2.5.1 QGIS	27
2.5.2 gvSIG	28
2.5.3 ArcGIS	28
3 Desarrollo del TFG	29
3.1 Introducción	29
3.2 Software QGIS	29
3.2.1 Introducción	29
3.2.2 Interfaz	29
3.2.3 Herramientas	30
3.3 Obtención de las capas	32
3.4 Selección de variables para método AHP	35

3.4.1 Núcleos de población.....	35
3.4.2 Distancia a carreteras	35
3.4.3 Distancia ríos/embalses	36
3.4.4 Elevación del terreno	37
3.4.5 Pendiente.....	37
3.4.6 Cobertura WiMAX	38
3.4.7 Uso de suelos	39
3.4.8 Variables excluidas	40
3.5 Selección de criterios	40
3.5.1 Núcleos de población.....	40
3.5.2 Elevación	40
3.5.3 Cobertura WiMAX	41
3.5.4 Distancia a embalses	41
3.5.5 Distancia a carreteras	41
3.5.6 Pendiente.....	41
3.5.7 Corine y zonas de especial conservación.....	41
3.6 Análisis de las capas	41
3.6.1 Capa núcleos de población	41
3.6.2 Capa de pendiente	44
3.6.3 Capa Corine Land Cover	45
3.6.4 Capa Cobertura WiMAX.....	47
3.7 Aplicación AHP	47
3.7.1 Implementación del método	47
3.7.2 Escala de Saaty	49
3.7.3 Ratio de consistencia	50
3.8 Asignación de valores	50
3.8.1 Distancia a núcleos de población.....	52
3.8.2 Distancia a embalses	55
3.8.3 Distancia a carreteras	56
3.8.4 Cobertura WiMAX	58
3.8.5 Elevación	59
3.8.6 Pendiente.....	61
3.9 Rasterización de las capas.....	62
3.9.1 Núcleos de población.....	64
3.9.2 Cobertura WiMAX	67
3.9.3 Embalses	68

3.9.4 Carreteras	69
3.10 Implementación MCDA.....	71
3.10.1 Matriz de comparación pareada.....	71
3.10.2 Matriz Normalizada	72
3.10.3 Cálculo del ratio de consistencia	73
3.10.4 Aplicación en QGIS.....	74
3.11 Estudio de Alternativas	75
3.11.1 Base militar avanzada en territorio enemigo	75
3.11.2 Base militar en zona de operaciones sin amenaza	77
3.11.3 Base aérea militar	78
4 Resultados y Discusión	81
4.1 Resultado de los casos estudio	81
4.1.1 Base militar con nivel medio/bajo de amenaza	81
4.1.2 Base militar avanzada en territorio enemigo	83
4.1.3 Base militar sin amenaza en zonas de operaciones	85
4.1.4 Base aérea militar	87
5 Conclusiones y líneas futuras	91
5.1 Conclusiones	91
5.2 Líneas futuras	92
6 Bibliografía.....	93

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Flujograma desarrollo trabajo. Elaboración propia	15
Figura 2-1 Aplicaciones SIG [18]	18
Figura 2-2 Capas SIG [5]	19
Figura 2-3 Representación de la altura [7]	21
Figura 2-4 Representación Red Vial [7].....	21
Figura 2-5 Representación Vectorial [4]	22
Figura 2-6 Representación ráster de la orientación de laderas [4]	23
Figura 2-7 Diferencia Conocimientos vs Datos [11].....	24
Figura 2-8 Modelo 3D Elevación del Terreno [17].....	26
Figura 2-9 Presentación ECDIS [18].....	26
Figura 2-10 Usuarios a lo largo del tiempo. Elaboración propia	27
Figura 3-1 Interfaz QGIS. Elaboración propia.....	30
Figura 3-2 Menú Ráster. Elaboración propia	30
Figura 3-3 Buffer de distancia. Elaboración propia	31
Figura 3-4 Herramienta Clipper. Elaboración propia.....	31
Figura 3-5 Capa MDT isla de La Palma. Elaboración propia	32
Figura 3-6 Logo Agencia de Información Geoespacial Letona [22].....	33
Figura 3-7 Ventana WMS de QGIS. Elaboración propia.....	34
Figura 3-8 Capa Núcleos de población de la isla de La Palma. Elaboración propia.....	35
Figura 3-9 Capa carreteras isla de La Palma. Elaboración propia	36
Figura 3-10 Capa de embalses isla de La Palma. Elaboración propia.....	36
Figura 3-11 Capa elevación isla de La Palma. Elaboración propia.....	37
Figura 3-12 Capa de pendientes isla de La Palma. Elaboración propia	38
Figura 3-13 Capa de cobertura isla de La Palma. Elaboración propia	39
Figura 3-14 Capa Corine Land Cover isla de La Palma. Elaboración propia	39
Figura 3-15 División de Territorios isla de La Palma. Elaboración propia.....	42
Figura 3-16 Municipios de La Palma. Elaboración propia.....	42
Figura 3-17 Tabla de Atributos Municipios de la isla de La Palma. Elaboración propia	43
Figura 3-18 Municipios filtrados isla de La Palma. Elaboración propia.....	43
Figura 3-19 Núcleos de población seleccionados isla de La Palma. Elaboración propia	44
Figura 3-20 Análisis de Terreno – Pendiente. Elaboración propia	44
Figura 3-21 Tabla de atributos capa Cobertura. Elaboración propia	47
Figura 3-22 Proceso AHP [11]	48
Figura 3-23 Menú buffer. Elaboración propia.....	51
Figura 3-24 Ventana buffer de distancia. Elaboración propia.....	51

Figura 3-25 Calculadora de campos. Elaboración propia	52
Figura 3-26 Población: (a) Criterio valor 1; (b) Criterio valor 3; (c) Criterio valor 5. Elaboración propia	53
Figura 3-27 Población: (a) Criterio valor 1 recortado; (b) Criterio valor 3 recortado. Elaboración propia	54
Figura 3-28 Buffers núcleos de población. Elaboración propia	54
Figura 3-29 Embalses: (a) Criterio valor 1; (b) Criterio valor 3; (c) Criterio valor 5. Elaboración propia	55
Figura 3-30 Buffers embalses. Elaboración propia	56
Figura 3-31 Carreteras: (a) Criterio valor 1; (b) Criterio valor 3; (c) Criterio valor 5. Elaboración propia	57
Figura 3-32 Buffers carreteras. Elaboración propia	58
Figura 3-33 Cobertura: (a) Criterio valor 1; (b) Criterio valor 5. Elaboración propia	58
Figura 3-34 Buffers cobertura. Elaboración propia.....	59
Figura 3-35 Criterios elevación. Elaboración propia	59
Figura 3-36 Pestaña r.reclass. Elaboración propia	60
Figura 3-37 Capa clasificada elevación. Elaboración propia	61
Figura 3-38 Criterios pendiente. Elaboración propia	61
Figura 3-39 Capa clasificada pendiente. Elaboración propia.....	62
Figura 3-40 Pestaña rasterizar. Elaboración propia.....	62
Figura 3-41 Pestaña rasterizar. Elaboración propia.....	63
Figura 3-42 Calculadora ráster. Elaboración propia.....	64
Figura 3-43 Población ráster: (a) Criterio valor 1; (b) Criterio valor 3; (c) Criterio valor 5. Elaboración propia	65
Figura 3-44 Capa ráster errónea distancia a población. Elaboración propia	66
Figura 3-45 Capa ráster núcleos de población. Elaboración propia.....	66
Figura 3-46 Cobertura ráster: (a) Criterio valor 5; (b) Criterio valor 1. Elaboración propia	67
Figura 3-47 Capa ráster cobertura. Elaboración propia.....	67
Figura 3-48 Embalses ráster: (a) Criterio valor 1; (b) Criterio valor 3; (c) Criterio valor 5. Elaboración propia	68
Figura 3-49 Capa ráster distancia a embalses. Elaboración propia	69
Figura 3-50 Carreteras ráster: (a) Criterio valor 1; (b) Criterio valor 3; (c) Criterio valor 5. Elaboración propia	70
Figura 3-51 Capa ráster carreteras. Elaboración propia	71
Figura 3-52 Zonas compatibles para el emplazamiento. Elaboración propia	75
Figura 4-1 Alternativas base con amenaza media/baja. Elaboración propia.....	81
Figura 4-2 Alternativas finales. Elaboración propia.....	82

Figura 4-3 Alternativas base militar avanzada. Elaboración propia.....84

Figura 4-4 Alternativas base militar sin amenaza. Elaboración propia.....86

Figura 4-5 Emplazamiento base militar sin amenaza final. Elaboración propia.....87

Figura 4-6 Alternativas base aérea militar. Elaboración propia89

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Características de representación cartográfica mediante análisis analógico y digital [6]	19
Tabla 3-1 Resumen criterios. Elaboración propia	40
Tabla 3-2 Uso de suelos Corine [27]	46
Tabla 3-3 Matriz de comparación pareada inicial. Elaboración propia.....	49
Tabla 3-4 Escala de Saaty [12]	49
Tabla 3-5 Valores de IA. Elaboración propia.....	50
Tabla 3-6 Matriz de comparación pareada. Elaboración propia.....	72
Tabla 3-7 Matriz normalizada. Elaboración propia.....	72
Tabla 3-8 Pesos de las variables. Elaboración propia	73
Tabla 3-9 Matriz de comparación pareada modificada. Elaboración propia.....	73
Tabla 3-10 Matriz normalizada modificada. Elaboración propia.....	74
Tabla 3-11 Pesos de las variables corregidos. Elaboración propia	74
Tabla 3-12 Criterios base avanzada. Elaboración propia	76
Tabla 3-13 Criterios base sin amenaza. Elaboración propia	77
Tabla 3-14 Criterios base aérea. Elaboración propia.....	79
Tabla 4-1 Matriz comparación pareada base militar avanzada. Elaboración propia.....	83
Tabla 4-2 Matriz normalizada base militar avanzada. Elaboración propia	83
Tabla 4-3 Pesos base militar avanzada. Elaboración propia	84
Tabla 4-4 Matriz de comparación pareada base sin amenaza. Elaboración propia.....	85
Tabla 4-5 Matriz Normalizada base sin amenaza. Elaboración propia	85
Tabla 4-6 Pesos base sin amenaza. Elaboración propia	86
Tabla 4-7 Matriz de comparación pareada base aérea. Elaboración propia.....	88
Tabla 4-8 Matriz normalizada base aérea. Elaboración propia	88
Tabla 4-9 Pesos base aérea. Elaboración propia	88

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Motivación

A lo largo de la historia, el concepto de base militar se ha ido extendiendo en gran medida a través de todo el mundo. El desarrollo de estas han variado desde pequeños campamentos situados a las fueras de las zonas de operaciones hasta lo que conocemos hoy como base militar, que se trata de un recinto con altas medidas de protección y cuyo fin varía dependiendo de la necesidad, que abarcan desde arsenales, bases aéreas y bases avanzadas en zona de operaciones hasta bases logísticas con bajo nivel de amenaza, bases de almacenamiento de munición y bases militares para recepción de tropas y material para su posterior traslado a bases más avanzadas.

Se puede establecer, que el proceso que conlleva la selección del emplazamiento de la base militar consiste en un largo trabajo que depende de numerosos factores y que tiene una gran importancia debido a que, gracias a este proceso, el curso de las operaciones transcurrirán de una manera u otra y ante todo, se deberá velar por la seguridad del personal que este situado en ella. Dicho proceso, ha ido variando a lo largo del tiempo de manera significante; en un principio, este consistía en estimaciones in situ, midiendo aquellos parámetros que se consideraban importantes, y una vez hecha las mediciones en estas, posibles localizaciones, se llegaba a la conclusión de cuál era la más idónea. Estas técnicas podían llegar a poner en peligro a aquellas personas encargadas de realizar este estudio, debido a que estas podrían estar localizadas en terrenos controlados por fuerzas enemigas o de difícil acceso. Este proceso se fue desarrollando hasta llegar a los procedimientos usados hoy en día, que son el uso de técnicas SIG para obtener la localización óptima del emplazamiento de una base militar. Estas técnicas recaban información geográfica en forma de capas de datos, y las presenta en un software, dentro del cual se pueden realizar numerosas operaciones, adaptándolo a las necesidades del problema.

Además de las capacidades que proporciona las técnicas SIG, también son de gran uso los métodos de análisis multicriterio, debido a que proporciona al equipo encargado de la realización del estudio de la localización del base, con unas técnicas que les permiten objetivar en cierta manera, que criterios son de mayor importancia sobre otros a la hora de realizar la selección del emplazamiento.

Todo este proceso conlleva la reducción de una gran parte del tiempo que requería anteriormente ejecutarlo y, además, se consiguen resultados con un mayor grado de exactitud y con mayor efectividad. Pero esta técnica tiene unas limitaciones, siendo la más importante de ellas, la obtención de los datos para ejecutar con el software todo el proceso de optimización. Sin los datos necesarios, en este caso, las capas de datos, no se pueden realizar los análisis pertinentes de la zona. Este ha sido uno de los mayores

inconvenientes del trabajo realizado, influyendo incluso, la elección del territorio en el que se realizó el estudio.

1.2 Objetivos

Para el desarrollo del trabajo, se establecen una serie de objetivos generales y unos objetivos específicos. Dentro de los objetivos generales se encuentra la familiarización con los sistemas de información geográfica, debido a su gran utilidad no solo en el ámbito de la selección de emplazamientos, sino también en el ámbito marítimo, como son los sistemas electrónicos de cartas digitales. Además de este objetivo, se destaca el profundizar en técnicas de elección de emplazamientos para bases militares, además de estudiar aquellas variables y criterios que influyen en mayor grado en este proceso. Por último, se establece el objetivo de conocer las técnicas de análisis multicriterio, en especial, el método AHP, debido a la importancia que tienen y la capacidad que poseen de objetivar ciertas decisiones en las cuales hay que realizar una elección dentro de varias alternativas.

Los objetivos específicos que se establecieron fueron, principalmente, conseguir establecer una serie de alternativas optimizadas para la selección del emplazamiento de una base militar, en función de unas variables escogidas, dentro de un territorio limitado y mediante el uso de técnicas SIG. Además, y una vez realizado el primer estudio, se establece el objetivo de variar el tipo de base militar, de manera que se varíen los criterios de los parámetros en función del tipo de establecimiento que se busque.

1.3 Metodología

A continuación, se expone un diagrama de flujos (*Figura 1-1*) en el cual se refleja de manera resumida, los pasos seguidos durante la realización del trabajo, que serán explicados de manera más detallada a lo largo de esta memoria.

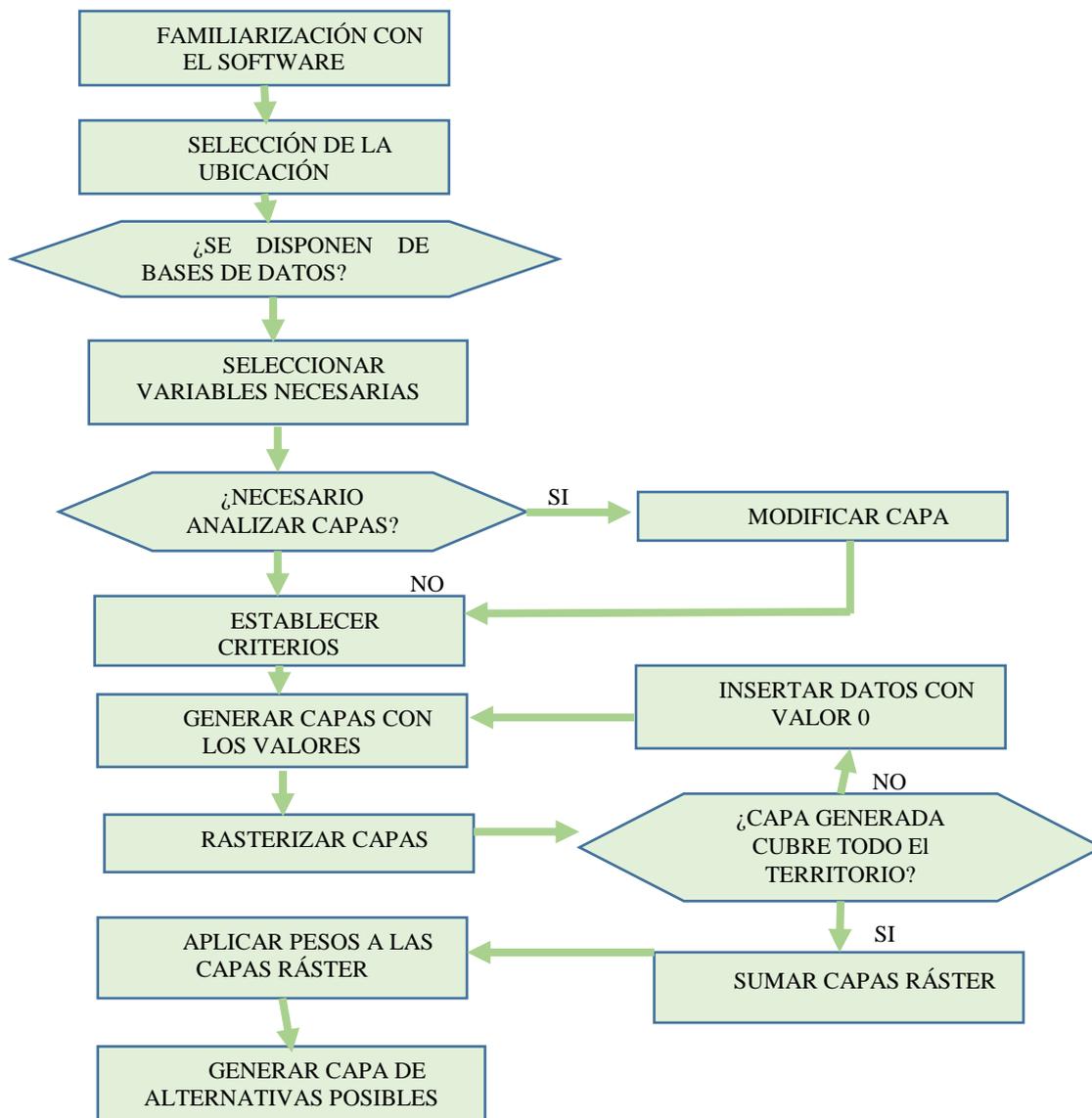


Figura 1-1 Flujograma desarrollo trabajo. Elaboración propia

1.4 Estructura del trabajo

El presente trabajo consta de cinco partes principales: la introducción a los sistemas de información geográfica y métodos de análisis multicriterio, desarrollo de los procedimientos necesarios para llevar a cabo el estudio, propuesta de varios casos estudio con el objeto de comprobar su eficiencia, generar los resultados de los casos estudios como una capa de datos y, por último, extraer una serie de conclusiones y líneas futuras. Estas cinco partes se han desarrollado en cinco apartados diferentes:

- Introducción: se realiza la introducción del tema del trabajo y su aplicación, al igual que los objetivos establecidos para el trabajo.
- Estado del arte: se expone una explicación de las técnicas que van a ser utilizadas y de aquellos programas existentes capaces de usar las técnicas SIG.
- Desarrollo: se expone la secuencia de pasos que se han seguido, desde la justificación de la elección del terreno estudiado y selección y procesado de las capas de datos, hasta la

aplicación de los métodos de análisis multicriterio y su implementación en el software utilizado.

- Resultados: se presentan las capas de datos generadas para cada uno de los casos, además de las matrices usadas para obtener los pesos de cada variable.
- Conclusiones: se plasman las conclusiones del análisis realizado y se presentan futuras líneas de investigación del uso de sistemas de información geográfica dentro de la optimización del emplazamiento de bases militares.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Introducción

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son usados en el mundo entero en una gran diversidad de actividades –administrativas, militares y científicas, por ejemplo- debido a que son capaces de llevar a cabo de manera eficiente el manejo de grandes cantidades de datos espaciales y de atributos, los cuales han sido extraídos de distintas fuentes. El uso de los SIG de manera independiente no ofrece la posibilidad de realizar la selección de un emplazamiento, debido a que no ofrecen la capacidad de realizar toma de decisiones basadas en análisis multicriterio y establecer recomendaciones de localizaciones óptimas. [1]

Por lo tanto, surge la necesidad de combinar métodos de toma de decisiones basadas en análisis multicriterio (MCDM, del inglés Multi-criteria Decision Making) y los Sistemas de Información Geográfica para obtener resultados para la optimización de emplazamientos de bases militares. La combinación de dichos métodos es un concepto ampliamente aceptado para resolver problemas espaciales en muchas áreas, tales como medioambiente, ecología, transporte, planificación urbanística y de manera creciente, emplazamientos de bases militares. [1]

Las técnicas SIG combinadas con métodos de análisis multicriterio son en la actualidad, el concepto más avanzado empleado por aquellos responsables en la toma de decisiones, para seleccionar la opción más idónea de una lista de posibles alternativas usando criterios establecidos y asignándoles prioridades. Dichas tecnologías se han expandido en el contexto militar debido a mejoras en este campo. Por ejemplo, el uso de tecnologías satélites y de teledetección (RS, del inglés Remote Sensing), ha traído consigo un aumento en la precisión y exactitud en zonas de combate. Por lo tanto, gracias a las prestaciones que ofrecen los métodos MCDA (Multi-criteria Decision Analysis), como son la capacidad de estructurar problemas de toma de decisiones, evaluándolos y priorizando dichas decisiones gracias a la experiencia del equipo encargado en realizar el análisis [2], los Sistemas de Información Geográfica se han convertido en una herramienta de gran utilidad para almacenar, analizar, manipular y gestionar información relativa a la localización de emplazamientos y mejorar la efectividad en futuras operaciones militares. [3]

Actualmente, muchas de las más modernas fuerzas armadas del mundo, utilizan las tecnologías SIG en sus procesos de toma de decisiones en el ámbito militar. Por ejemplo, en todas las ramas de las Fuerzas Armadas Estadounidenses, se sitúa un conjunto de especialistas encargados en datos geoespaciales y su análisis, como puede ser el U.S. Army's 12Y-Gespatial Engineer [3]. Por lo tanto, el empleo de SIG conlleva una exactitud mayor en el análisis de información para establecimiento de bases o instalaciones

que tecnologías usadas anteriormente, además de mejorar la capacidad de compartir dicha información, creando así, una imagen común del ambiente geográfico en un periodo de corta duración.

2.2 Sistemas de Información Geográfica

2.2.1 Definición

El término Sistema de Información Geográfica es difícil de definir. Dichos sistemas representan la integración de un gran número de áreas subjetivas. Existe una definición que es aceptada de manera general y que es redactada por el Centro Nacional de Análisis e Información Geográfica (NCGIA, del inglés National Centre of Geographic Information and Analysis): un SIG es un sistema de hardware, software y procedimientos para facilitar el manejo, manipulación, análisis, modelado, representación y presentación de datos georreferenciados para resolver problemas complejos relacionados con el planeamiento y administración de los recursos. [4]

Los Sistemas de Información Geográfica han ido evolucionando hasta convertirse en una herramienta esencial e indispensable para la administración y planeamiento urbano y de recursos. Su capacidad para almacenar, extraer, analizar, modelar y mapear áreas de gran extensión, con un gran volumen de datos espaciales, le ha llevado a una proliferación extraordinaria de aplicaciones. Los SIG son empleados en la actualidad para el planeamiento del uso de suelos, administración de empresas de servicio público, modelado de ecosistemas, evaluación y planificación de paisajes, planeamiento de infraestructura y transportación, análisis de mercados, análisis del impacto visual, administración de instalaciones, evaluación de impuestos, análisis de inmuebles y muchas otras aplicaciones (*Figura 2-1*). Algunas de las funciones de los SIG incluyen: entrada, presentación y administración de datos, retirada de información y análisis.

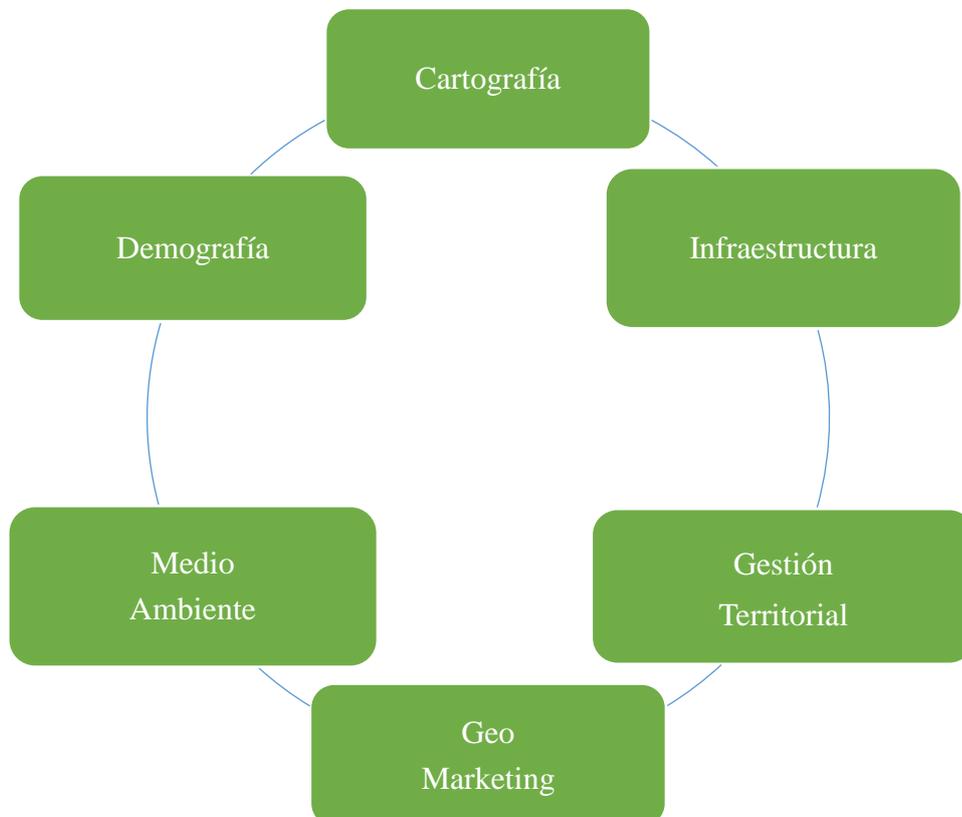


Figura 2-1 Aplicaciones SIG [18]

Para comprender de manera más sencilla como se definen los SIG, se puede visualizar la disposición en capas (*Figura 2-2*) del conjunto de datos que lo componen. Este conjunto de datos los podemos definir como, el grupo de mapas de la misma zona de un territorio, donde una localización conocida tiene las mismas coordenadas en todos los mapas incluidos en el sistema. De esta manera, es posible analizar sus características temáticas y espaciales para obtener un mayor conocimiento de dicha zona.

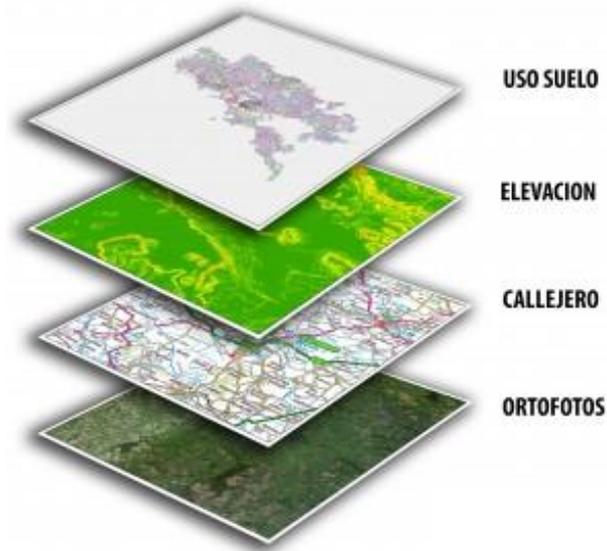


Figura 2-2 Capas SIG [5]

2.2.2 Representación de datos

Los datos (*Tabla 2-1*) son una parte imprescindible de los SIG, ya que sin su existencia, las aplicaciones SIG y los restantes elementos que se encuentran en torno a estas no tendrían utilidad. Es necesario conocer el área geográfica que es estudiada en un SIG, o lo que es igual, disponer de los datos de dicha zona para proceder al estudio.

Una de las principales preocupaciones principales ha sido la de representar de la mejor manera posible toda la información que podemos extraer de una zona geográfica dada, de tal modo que se pueda almacenar y analizar en el entorno de un SIG. Este proceso de representación, ha sido responsable en gran parte de la arquitectura y forma actual de los Sistemas de Información Geográfica y por lo tanto se le debe en gran parte, el desarrollo experimentado por los SIG y las disciplinas afines. El proceso de convertir la realidad relativa a un variable dada en una capa implica la construcción de un modelo, que representa la realidad y pueda servir para conocer esta en profundidad a través de análisis que se llevaran a cabo sobre el modelo en sí.

Datos Digitales	Datos Analógicos
Fácil de Actualizar	Difícil de Actualizar
Transferencia de datos fácil y sencilla	Transferencia lenta
Espacio reducido de almacenamiento	Grandes espacios de almacenamiento
Mantenimiento sencillo	Los mapas en papel se estropean con el tiempo
Análisis automático y fácil	Análisis difícil e inexacto

Tabla 2-1 Características de representación cartográfica mediante análisis analógico y digital [6]

Dicho proceso que lleva desde la realidad hasta un conjunto de meros valores numéricos, el cual se profundizará como mayor detalle más adelante, se divide en tres niveles:

- Establecimiento de un modelo geográfico, es decir, un modelo conceptual de la realidad geográfica y de cómo se comporta.
- Establecimiento de un modelo de representación; una vez establecido el modelo geográfico, se reduce a una serie finita de elementos.
- Establecimiento de un modelo de almacenamiento, es decir, un esquema de como almacenar los elementos obtenidos en el modelo de representación.

2.2.2.1 Modelo geográfico

Para comenzar la generación de un dato geográfico, se necesita el establecimiento de un modelo conceptual relativo a como se ha de interpretar la realidad geográfica. Se realiza conceptualizando el espacio estudiado, la variable tratada y la variación de esta a lo largo del espacio. Este modelo geográfico es un esquema mental con el que se constituye una forma particular de comprender el hecho geográfico en sí, pero que todavía no incorpora elementos relativos a su representación o almacenamiento. [7]

Se pueden destacar dos modelos geográficos de los muchos existentes:

- Campos: es un modelo de variación dentro de un marco n-dimensional, en el cual en cada punto dentro de dicho marco se tiene un valor de la variable estudiada. En su concepto matemático, un campo es una función de la forma $\varphi: \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}^m$, esto es, una función que asocia cada punto de un espacio vectorial con otro de un espacio vectorial distinto. [7]
- Entidades discretas: al contrario que los campos, el modelo de entidades discretas no asocia a cada punto geográfico un valor, sino que concibe un entorno geográfico como un espacio vacío sobre el que se sitúan distintos elementos (entidades) que lo van rellenando. Cada una de dichas entidades posee unas características propias, constantes para todas ellas, que son las que conferirán sus propiedades particulares a los puntos que se sitúen en su interior.

2.2.2.2 Modelo de representación

Una vez obtenidos los modelos geográficos (apartado 2.2.2.1), el siguiente paso será el de reducir las propiedades de dichos modelos a un conjunto finito de elementos, por lo que de esta manera, el registro de dichos elementos sirva para almacenar la realidad que los modelos geográficos describen. Para ellos se emplean *modelos de representación*, también denominados *modelos de datos*.

Se puede observar en la *Figura 2-3*, distintas formas de representar la elevación de una zona, la cual es una variable continua y puede concebirse mediante un campo escalar. En la *Figura 2-4*, podemos observar que la red vial se adapta mejor a un modelo de entidades discretas

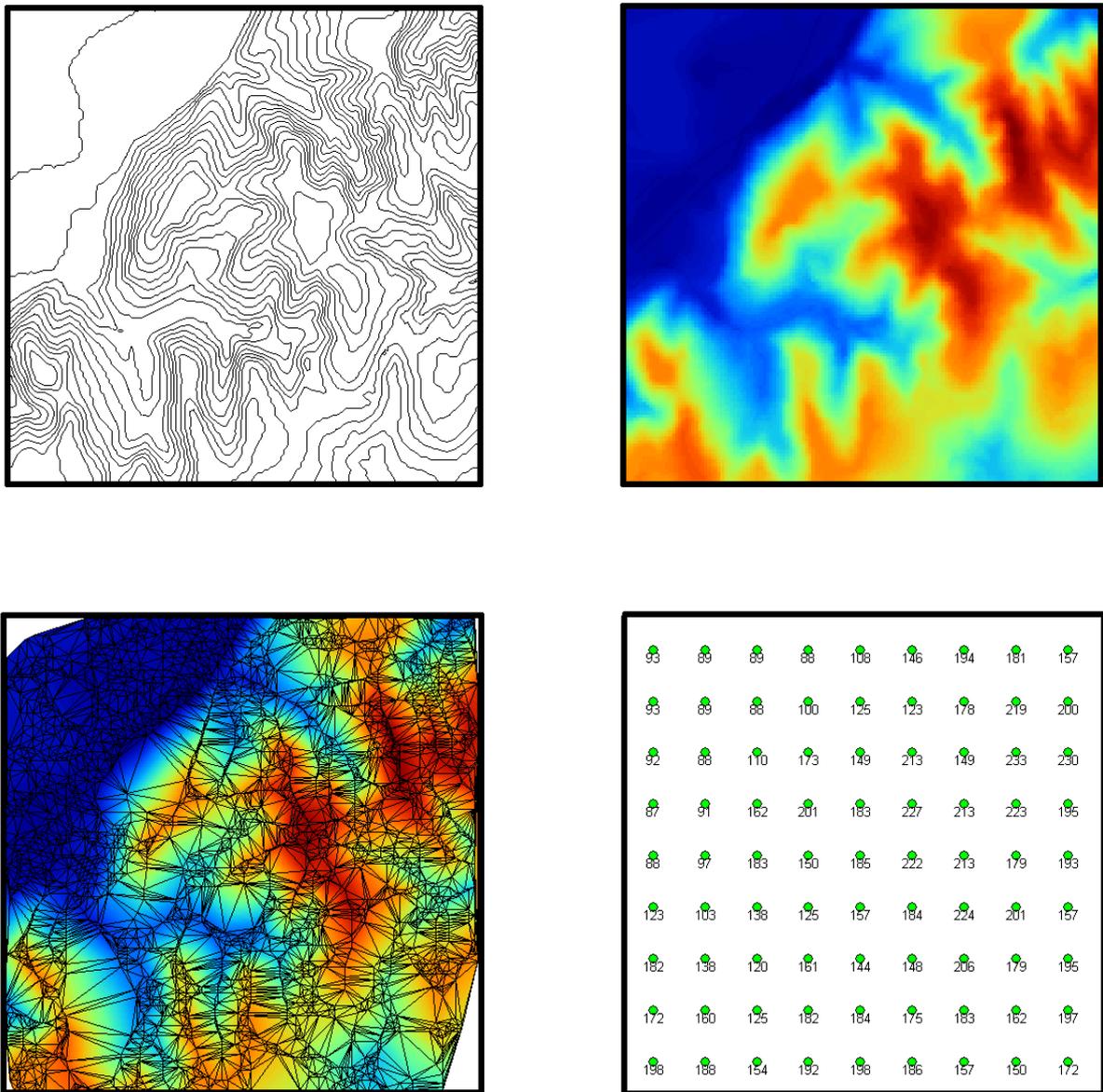


Figura 2-3 Representación de la altura [7]

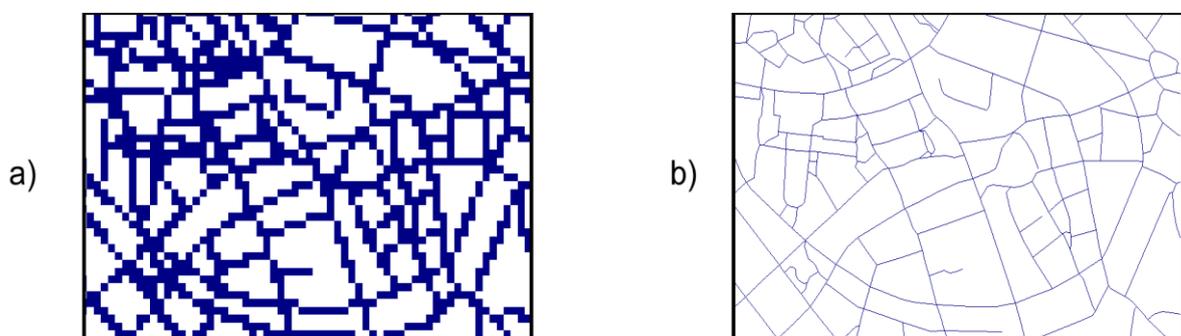


Figura 2-4 Representación Red Vial [7]

2.2.2.2.1 Modelos Vectoriales

En los modelos vectoriales (*Figura 2-5*), los datos geoespaciales son representados en la forma de coordenadas. En los datos vectoriales, las unidades básicas de información espacial son los puntos, líneas y los polígonos. Cada una de las anteriores se corresponde con uno o más pares de coordenadas; es decir, una línea es una colección de puntos relacionados entre sí y un polígono se encuentra formado por una serie de líneas que se relacionan conjuntamente. [8]

Los sistemas vectoriales constan de dos componentes, uno de ellos almacena los datos espaciales y el otro los datos temáticos. Se trata de un sistema de organización híbrido, puesto que es capaz de unir una base de datos relacional, para los aspectos temáticos, y una base de datos topológica, para los datos geográficos. Un elemento clave de ese sistema es el identificador (ID) que lleva adjunto cada objeto. Este ID es único y diferente para cada objeto y es lo que permite relacionar ambas bases de datos [6]

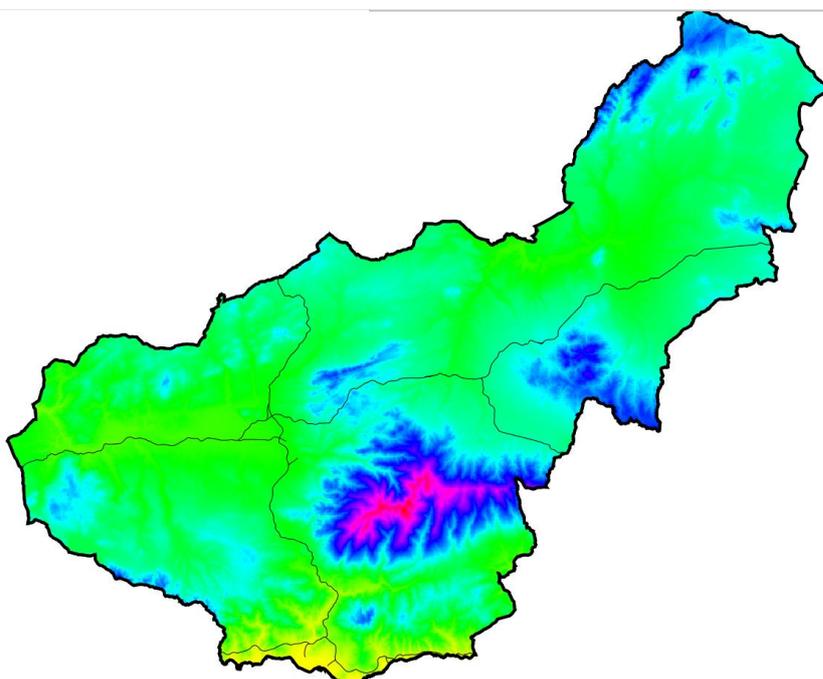


Figura 2-5 Representación Vectorial [4]

2.2.2.2 Modelos Ráster

Ráster es un método para almacenar, procesar y presentar datos espaciales. Cada área es dividida en filas y columnas, las cuales forman una estructura con una cuadrícula regular. Cada celda deberá tener forma de rectángulo, no siendo obligatoria que sea un cuadro. Cada celda situada dentro de una matriz, contiene coordenadas de localización además de un valor atributo. La localización espacial de cada una de las celdas está contenida implícitamente dentro del orden de la matriz, no siendo el caso de la estructura vectorial, la cual almacena su topología de manera explícita. Aquellas áreas que contengan el mismo valor atributo son reconocidas como iguales, en cambio, las estructuras ráster no pueden llegar a identificar los límites de dichas áreas al contrario que los polígonos. El conjunto de datos ráster son una abstracción del mundo real donde los datos espaciales son expresados como una matriz de celdas o píxeles (*Figura 2-6*), con la posición espacial implícita en el orden de dichos píxeles. Uno de los problemas con estructuras ráster es que pueden llegar a incrementar el tamaño de los datos guardados debido a que estas guardan cada celda de la matriz, ya sean aquellas que contengan datos o aquellas que son simplemente espacio en blanco.

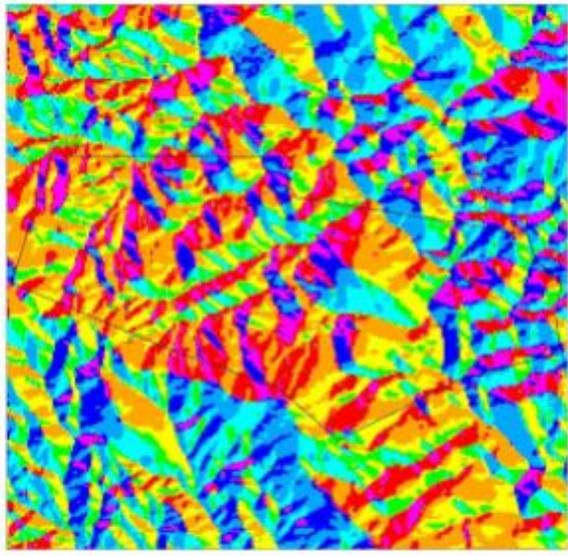


Figura 2-6 Representación ráster de la orientación de laderas [4]

2.2.2.3 Modelo de Almacenamiento

Los modelos de almacenamiento son el último escalón en la cadena de las sucesivas etapas que engloban el proceso que lleva desde la realidad existente al conjunto de simples valores numéricos que se almacenan y manejan en un SIG y los cuales modelizan dicha realidad. Los modelos de representación definen una manera de recoger la realidad mediante el uso de unidades básicas, mientras que los modelos de almacenamiento realizan un planteamiento sencillo que consiste en un esquema de cómo convertir dichas unidades en valores numéricos de manera eficiente. Es decir, como escribir dichos valores en un soporte digital o guardarlos en la memoria del ordenador de la mejor manera posible [7]

Los modelos de almacenamiento deben atender principalmente a dos necesidades básicas, que son las que definirán su idoneidad para cada tarea y tipo de dato:

- Minimizar el espacio ocupado por los datos
- Maximizar la eficiencia del cálculo

2.3 Métodos de Análisis Multicriterio

2.3.1 Introducción

Los métodos de análisis multicriterio (MCDA, del inglés Multi-criteria Decision Analysis) considera una serie de criterios que se junta en el momento de realizar las tomas de decisiones; es una subdisciplina correspondiente a la investigación de operaciones [9]. Se han desarrollado durante los últimos años una variedad de enfoques y métodos para la implementación de los métodos de análisis multicriterio en un conjunto de diferentes disciplinas, que se extienden desde las ciencias sociales hasta las ciencias naturales.

Existen un gran número de métodos en MCDA, por ejemplo, el Proceso de Análisis Jerárquico (AHP, analytic hierarchy process), Decision Expert (DEX), Análisis de cobertura de datos, Técnicas de orden de Preferencias por Similitud a la Opción Ideal (TOPSIS, del inglés Technique for the order of Preference by Similarity to Ideal Solution), etc. Se podrían llegar a nombrar más de 33 métodos para aplicar métodos de análisis multicriterio; sin embargo, la mayor parte de dichos métodos, son aplicados a un número reducido de alternativas, debido a las limitaciones existentes en computación o práctica [9].

MCDA es una técnica basada en conocimientos; a diferencia de las técnicas basadas en datos, el progreso realizado mediante técnicas basadas en conocimientos no depende de la obtención de datos. En dichas técnicas, la generación y uso de los conocimientos es la parte fundamental en la creación de los procedimientos (*Figura 2-7*). En cambio, en los procesos basados en datos, se hace el uso del Big Data, que consiste en un conjunto de datos o la combinación de estos, donde su tamaño, variabilidad y velocidad de crecimiento, dificultan su captura, gestión, procesamiento o análisis mediante el uso de tecnologías y herramientas convencionales, como pueden ser bases de datos relacionales o estadísticas convencionales [10].

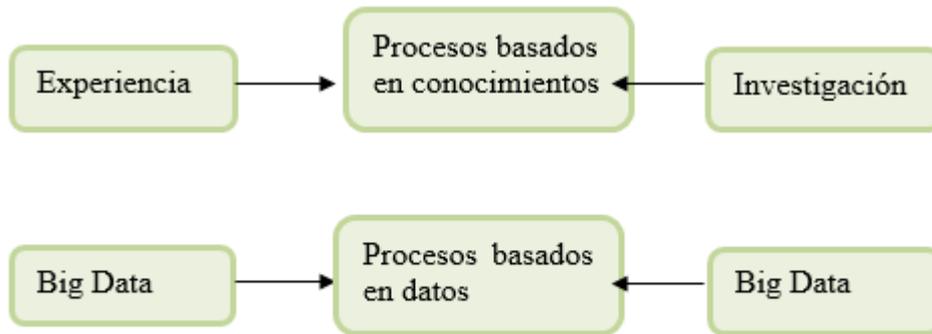


Figura 2-7 Diferencia Conocimientos vs Datos [11]

2.3.2 Proceso de Análisis Jerárquico

El proceso de análisis jerárquico (AHP, de sus siglas en inglés, Analytic Hierarchy Process) [12] es un método ampliamente conocido dentro de las técnicas multicriterio, la cual ha sido incorporada a los procedimientos de idoneidad basados en SIG [13]. En este método, la información necesaria para resolver los problemas de toma de decisiones puede ser dividida tanto de forma cualitativa como cuantitativa [12]. AHP es un método flexible y cuantitativo, el cual se emplea para la selección de ciertas alternativas que han sido escogidas en función de la relación que han obtenido en base a una serie de criterios seleccionados. Los valores relativos necesarios para cada criterio pueden ser extraídos de una matriz de comparación pareada de dichos criterios usando el método AHP. Una vez obtenido los pesos para cada criterio a través del método de comparación de los diferentes parámetros, las puntuaciones resultantes son usadas para ordenar las diferentes alternativas, desde la más adecuada hasta la menos deseada [11].

Por lo tanto, AHP cuenta con ciertas ventajas cuando los elementos de mayor relevancia son difícilmente comparables o cuantificables o cuando dentro del equipo encargado de llevar a cabo la toma de decisión, existe una limitación en la comunicación entre los miembros de dicho equipo. Existe una variedad de situaciones donde el uso de AHP puede ser más óptimo [14]:

- Selección: necesidad de elegir una alternativa de un conjunto, en base a múltiples criterios.
- Priorización: establecer las prioridades de un conjunto de alternativas.
- Asignación de recursos: para repartir recursos entre varias alternativas
- Benchmarking: comparación de los procesos de una organización con la mejor del sector donde se encuentre situada.
- Gestión de calidad: manejo de aspectos multidimensionales de calidad y la mejora de la calidad

Además, se pueden listar una serie de casos prácticos donde se ha llevado a cabo el uso de esta metodología para poder llegar a una solución donde se proponen un conjunto de alternativas:

- Decidir la mejor forma para disminuir el impacto producido por el cambio del clima global (Fondazione Eni Enrico) [14].
- Medir la calidad general de sistemas de información (Microsoft Corporation) [14].

- Seleccionar profesores universitarios (Universidad Bloomsburg de Pennsylvania) [14].
- Decidir la ubicación de plantas de fabricación en el extranjero (Universidad de Cambridge) [14].
- Evaluar el riesgo de las operaciones de los gasoductos de petróleo del país (Sociedad Americana de Ingenieros Civiles) [14].
- Establecimiento de la mejor manera de administrar las cuencas hidrográficas de USA (Ministerio de Agricultura de Estados Unidos) [14].

2.4 Aplicaciones Militares

Los sistemas de Información Geográfica tienen un papel fundamental en las operaciones militares ya que dichas operaciones están relacionadas íntimamente con el espacio natural. El concepto de Mando y Control, Comunicaciones y Coordinación en operaciones militares dependen en gran medida de la disponibilidad de información precisa y de tomar las decisiones de la manera más rápida posible. En la era digital, los SIG son una herramienta excelente para los comandantes en operaciones militares. El uso de estas aplicaciones SIG en fuerzas militares ha revolucionado la forma en la que dichas fuerzas operan y funcionan actualmente. El uso de los SIG en operaciones varía desde su uso para cartografía, inteligencia, administración del terreno enemigo, análisis de terrenos, teledetección, administración de instalaciones militares y monitorización de posibles actividades terroristas [15].

2.4.1 Gestión del Patrimonio de Defensa

El valor de las tecnologías SIG como apoyo administrativo es de gran importancia. El Ministerio de Defensa es el encargado de la gestión de diversas porciones del territorio nacional, por lo que una gestión efectiva del Patrimonio de Defensa necesita un esfuerzo importante. En este contexto, el Ministerio de Defensa junto con las tres ramas de las Fuerzas Armadas son ayudadas mediante el empleo de técnicas de mapeo tanto digital como analógico las cuales son consistentes y precisas en todos sus aspectos.

El uso de los SIG en la gestión del mantenimiento de las instalaciones de las bases militares ayuda a la reducción de costes, aumento de la efectividad de la misión, proveer de una manera rápida capacidades para analizar estrategias alternativas, mejorar comunicaciones y almacenar conocimientos institucionales [15].

2.4.2 Evaluación del Terreno

En las operaciones realizadas por tierra, los comandantes tienen la necesidad de conocer las condiciones del terreno y elevaciones para conocer las limitaciones para el uso de carros de combate y empleo de ciertas armas, empleando Modelos Digitales de Terreno (MDT), tal y como se puede ver en la *Figura 2-8*. Además, necesitan saber cómo es la vegetación del terreno, red de carreteras, las líneas de comunicaciones para optimizar el empleo de sus recursos y un mapa del terreno detallando el uso de suelos, modelo del terreno y la proximidad a núcleos poblados. Todos estos datos tendrán que estar dispuestos para que los comandantes hagan uso de ellos para establecer la posición de las unidades y las comunicaciones en el área de operaciones. También se podría emplear para realizar ataques a blancos si se disponen los datos necesarios para que el uso de las armas se efectivo [16].

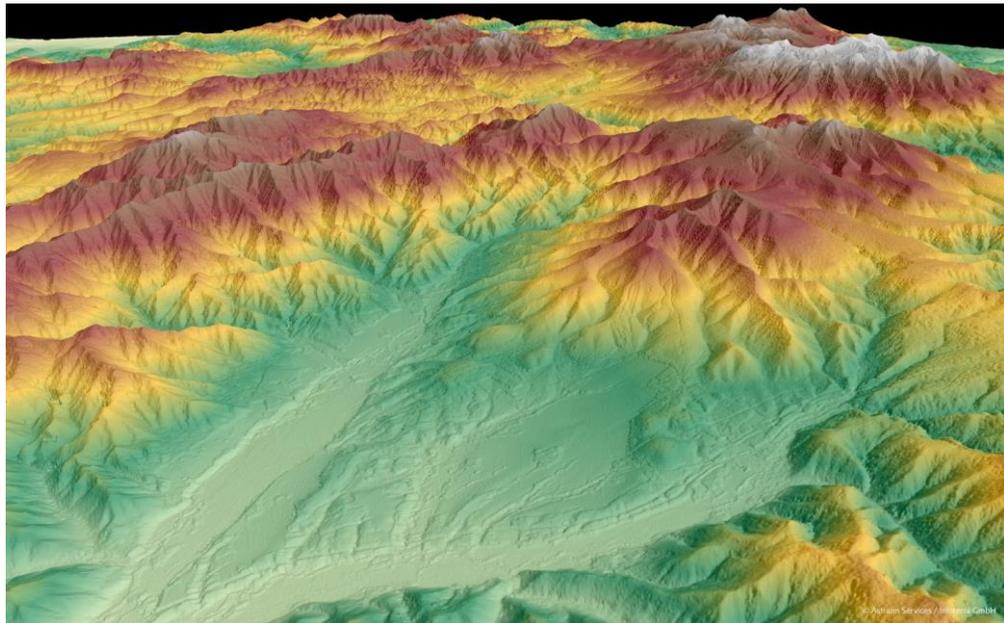


Figura 2-8 Modelo 3D Elevación del Terreno [17]

2.4.3 Operaciones Navales

Los buques Navales dependen en gran parte en métodos indirectos para navegar cuando no disponen de ayudas visuales para posicionarse. El *Global Positioning System* (GPS) proporciona los medios necesarios para posicionarse y la sondas proporcionar una medida de la profundidad de la zona donde están navegando.

La reciente introducción de las *Electronic Chart Display and Information System* (ECDIS, Figura 2-9) en el puente de los buques, ayudan al oficial a gobernar el barco de manera segura bajo todo tipo de condiciones ambientales. Las cartas electrónicas son el sustituto para las cartas de papel, las cuales se han usado para hallar la posición del buque y dar información acerca de los peligros próximos, ayudas a la navegación y la profundidad alrededor de la posición del buque. La presentación de las ECDIS se puede usar para filtrar o seleccionar cierta información necesaria para que el oficial de guardia navegue de manera segura. Las cartas electrónicas son la base de datos para técnicas SIG y las ECDIS es la aplicación de los SIG en tiempo real en un ambiente marino [15].

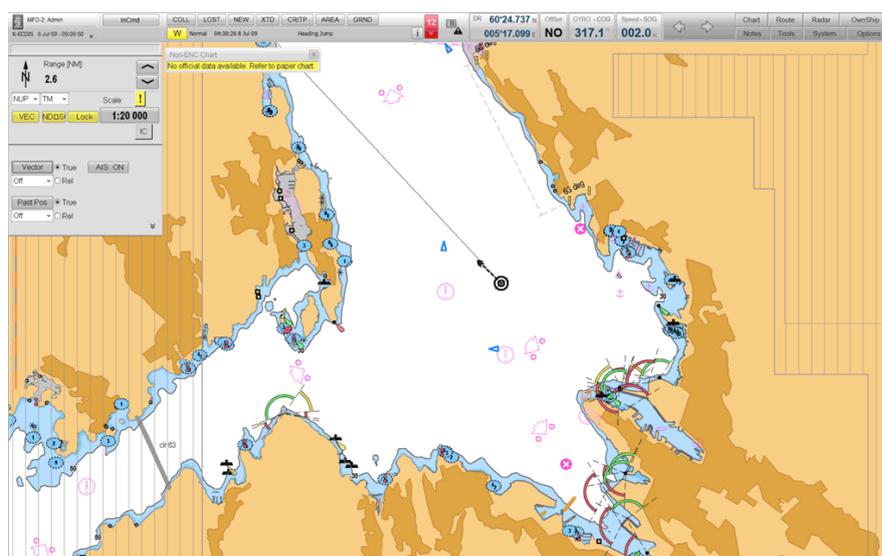


Figura 2-9 Presentación ECDIS [18]

2.5 Programas SIG

Existe una amplia variedad de programas que pueden ser usados para manipular contenido geográfico y que permite el empleo de técnicas SIG. Dichos programas se pueden dividir en dos grupos principales, los cuales son programas gratuitos y programas de pago. Dentro de cada uno de estos grupos se puede encontrar una extensa lista de programas, pero cabe reseñar solo algunos de dichos programas ya que son los que ofrecen mayores prestaciones y que actualmente, son aquellos programas empleados con mayor frecuencia para la aplicación de técnicas SIG. En cuanto a programas libres se refiere, cabe destacar QGIS y gvSIG; para aquellos programas en los cuales hay que hacer uso de una licencia de pago, se destaca ArcGIS.

2.5.1 QGIS

Es el software libre más usado en la actualidad; a lo largo de los últimos años, su uso ha ido aumentando de manera mucho mayor que el resto de los softwares libres existentes (*Figura 2-10*). QGIS es un cliente SIG de escritorio el cual se adapta muy bien a dichos sistemas, donde se puede visualizar, administrar, editar, analizar datos y componer mapas. Incluye una potente funcionalidad de análisis mediante la integración con GRASS (del inglés, *Geographic Resources Analysis Support System*). Es compatible con Linux, Mac OSX, Unix y Windows y además soporta numerosas funcionalidades y formatos vectoriales, ráster y base de datos [19].

Algunas de las ventajas que ofrece QGIS se relatan a continuación [20]:

- Interfaz flexible: su funcionamiento es similar en cualquiera de los diferentes sistemas operativos en los que puede ser desplegado.
- Interoperabilidad: el software opera bajo licencia GNU GPL. Esto quiere decir que QGIS puede ser modificado libremente, con el objetivo de variar las funcionalidades dependiendo del uso que se le requiera.
- Conexión a base de datos: la facilidad de conexión a base de datos, en particular PostgreSQL y PostGis, es una de las grandes ventajas que tiene QGIS con respecto a otros SIG donde la conexión es más complicada.
- Amplio abanico de complementos: permite instalar una gran cantidad de complementos, de los cuales, muchos tienen una importante utilidad para el estudio que se va a realizar. Alguno de estos puede ser mmqgis, Qgis2threejs o Table Manager.
- Integración con GRASS: dicho complemento proporciona acceso a las bases de datos y funcionalidades GIS de GRASS, como digitalización de capas vectoriales, creación de nuevas capas vectoriales o edición de datos GRASS en 2D y 3D.

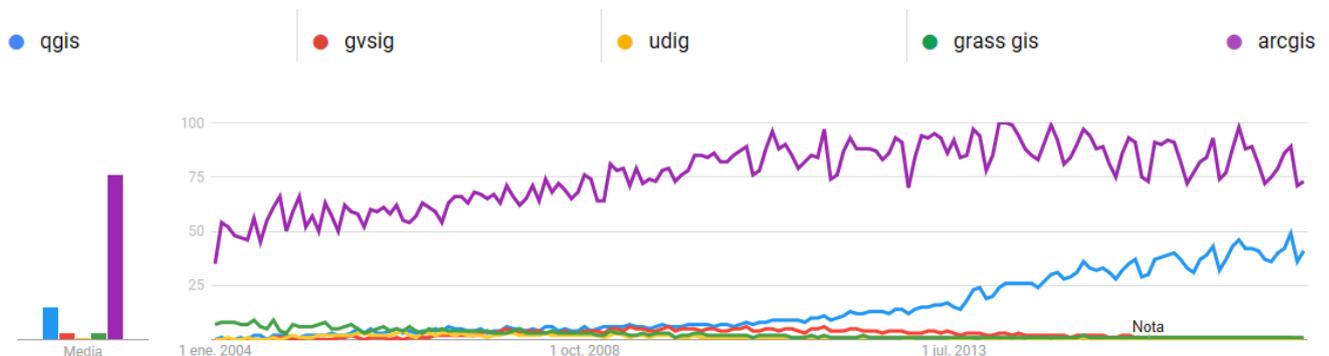


Figura 2-10 Usuarios a lo largo del tiempo. Elaboración propia

2.5.2 *gvSIG*

Es un software integrador, con capacidad de trabajar con información procedente de cualquier tipo u origen, en ambos formatos, vectorial y ráster, y el cual tiene en común alguna característica más con JUMP como su arquitectura modular o su carácter multiplataforma. Permite el uso de formatos de otros programas como Autocad, Microstation o ArcView, de acuerdo con los parámetros de la OGC (Open Geospatial Consortium) que se encarga de la regulación de estándares abiertos e interoperables de los Sistemas de Información Geográfica [21].

A continuación, se describen algunas de las ventajas que ofrece gvSIG:

- **Portable:** al igual que QGIS, este programa es capaz de operar en distintas plataformas como Linux y Windows.
- **Modular:** es ampliable con nuevas funcionalidades una vez finalizado su desarrollo.
- **Interoperable con las soluciones ya implantadas:** es capaz de acceder a los datos de otros programas propietarios sin necesidad de cambiarlos de formatos.

2.5.3 *ArcGIS*

El sistema ArcGIS es el software de pago más empleado en la actualidad. Dicho sistema constituye un sistema integrado completo, que comparte la misma arquitectura de componentes para poder manipular, distribuir, crear y analizar la información geográfica. Usa estándares abiertos como XML, COM y SQL para poder comunicarse con base de datos y servidores.

ArcGIS engloba muchas de las funcionalidades de los programas nombrados anteriormente, por lo que le convierte en uno de los programas líderes, con el inconveniente de que es necesario la adquisición de una licencia de pago para poder hacer uso de él.

3 DESARROLLO DEL TFG

3.1 Introducción

Este apartado del trabajo, se relatará el proceso seguido para obtener los resultados deseados, además de exponer aquellos problemas que surgieron a lo largo de este y como fueron solucionados. Dicho desarrollo se ha dividido en la serie de pasos que fueron seguidos, empezando por una explicación del software empleado, obtención, procesado y análisis de las capas y por último un pequeño estudio de posibles alternativas de varios tipos de bases militares. Las explicaciones se realizarán en función del ejemplo de una base militar con un cierto grado de amenaza, para poder exponer de manera más gráfica como se realizó todo el proceso.

3.2 Software QGIS

3.2.1 Introducción

El programa seleccionado para la realización de la optimización del emplazamiento de una base militar ha sido QGIS. Esto se ha debido primordialmente a que es un software de licencia gratuita, además de todas las características y prestaciones descritas en el apartado 2.5.1.

Antes del comienzo del estudio, se llevó a cabo una familiarización del programa compuesta por el estudio de la interfaz principal del programa y de las distintas herramientas principales que facilita; esta familiarización fue llevada a cabo para que, durante la realización del trabajo, los procesos se realizaran con una mayor fluidez.

3.2.2 Interfaz

El primer paso que se realizó en el proceso de familiarización del programa fue el estudio de la interfaz que ofrece. Dicha interfaz es una de las ventajas principales de las que dispone el programa, ya que es muy intuitiva y de gran ayuda a la hora de comenzar con el programa.

En la *Figura 3-1* se puede apreciar una imagen de lo que sería la interfaz principal del programa una vez que se abre y se crea un nuevo proyecto. Las principales funciones son las de añadir nuevas capas, tanto ráster como vectoriales, añadir capas WMS, que son capas obtenidas a través de un servidor web o la creación de una capa vectorial; todas estas funciones se encuentran localizadas en el lado izquierdo de la interfaz.

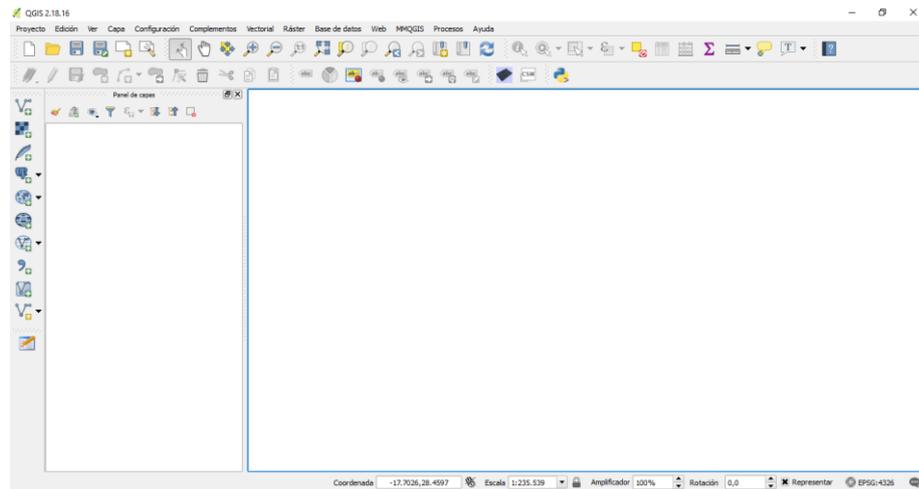


Figura 3-1 Interfaz QGIS. Elaboración propia

En la parte superior se encuentran todas las funciones disponibles del programa; de estas cabe destacar las pestañas de ráster (*Figura 3-2*), vectorial y complementos. En las dos primeras se reúnen todas las posibles operaciones que se pueden realizar a las distintas capas, que posteriormente usaremos para llegar al resultado deseado y que se comentaran en el apartado 3.2.3; los complementos son pequeños programas que corren dentro de QGIS y que son utilizados para realizar ciertas tareas específicas. Para el desarrollo del trabajo se han descargados varios de dichos complementos como pueden ser “Table Manager”, para modificar la tabla de atributos de una capa, “Open Layers”, que permite la visualización de capas de Google sobre el lienzo de QGIS o “Análisis de Terreno”, para generar mapas de pendiente y curvas de nivel.

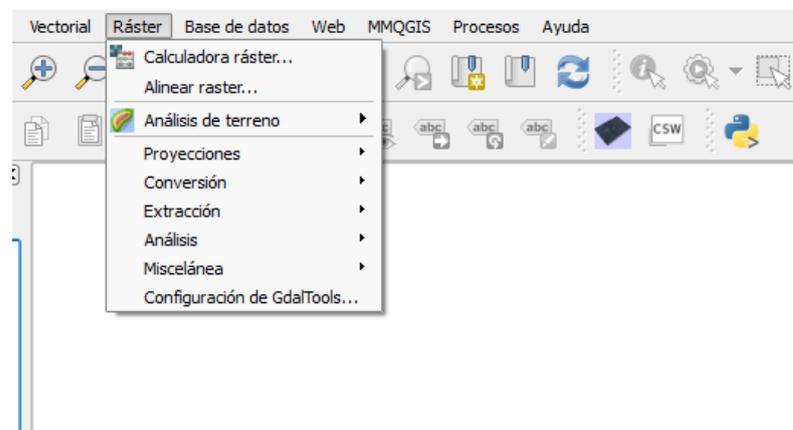


Figura 3-2 Menú Ráster. Elaboración propia

3.2.3 Herramientas

Para realizar el análisis de las capas para poder generar una solución final, es necesario una serie de herramientas con las cuales se obtendrán los resultados definitivos para este trabajo. Se destacarán las herramientas de mayor importancia y que han sido usadas con mayor frecuencia:

- *Buffer*: herramienta cuya función es la de generar un determinado área alrededor de una figura vectorial (*Figura 3-3*), que permitirá establecer criterios de distancias en diferentes capas para poder darles valor y alcanzar la alternativa más adecuada.

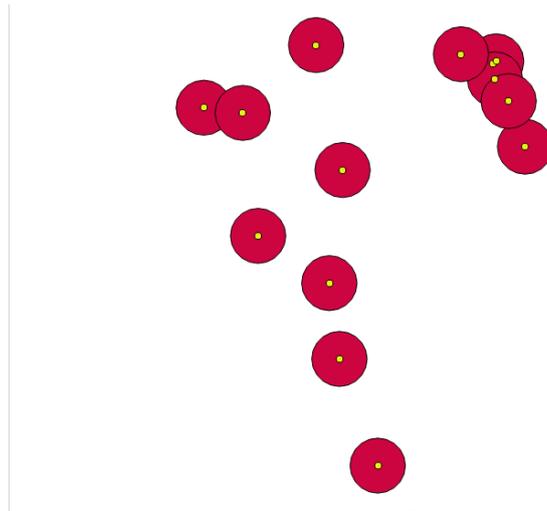


Figura 3-3 Buffer de distancia. Elaboración propia

- *Cortar*: esta herramienta corta una capa vectorial usando los polígonos de otra capa. Solo las zonas de la capa vectorial que residen dentro de la capa de polígonos se añadirán a la nueva capa resultante. Los valores de la tabla de atributos no se verán afectados y no sufrirán ningún cambio.
- *Conversión*: esta herramienta permitirá rasterizar una capa, es decir, convertir una capa vectorial en una capa ráster, y poligonizar, que consiste en el caso contrario, una capa ráster en una capa vectorial.
- *Extracción*: se podrán obtener a partir de esta herramienta las curvas de nivel de una zona partiendo de un Modelo Digital de Terreno (MDT) y también el uso de la función *Clipper* (Figura 3-4), que tiene una finalidad parecida a la de *Cortar*, pero en este caso, en vez de usar dos capas vectoriales, se corta una capa ráster con la forma de una capa máscara la cual será una vectorial.

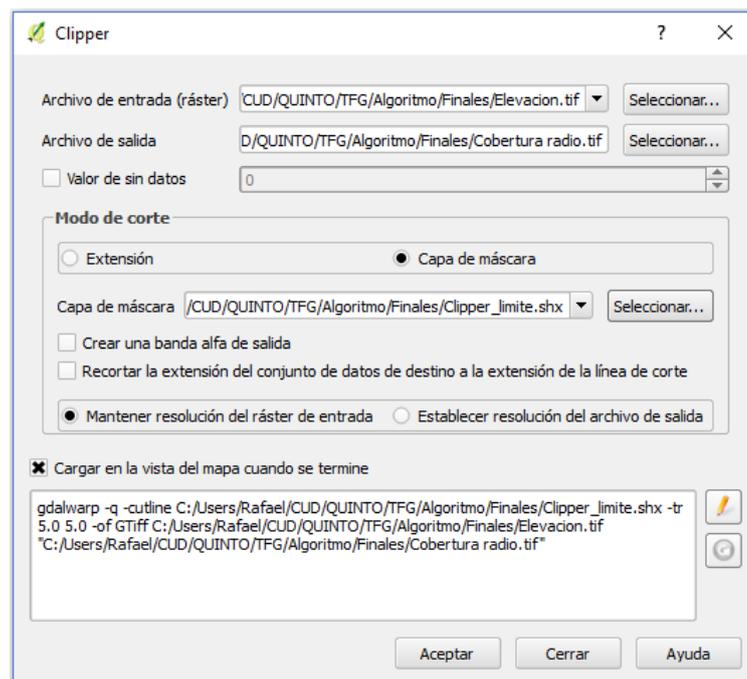


Figura 3-4 Herramienta Clipper. Elaboración propia

- *Análisis de MDT*: esta herramienta nos permitirá adquirir a partir de un MDT (*Figura 3-5*), varias capas que nos serán de gran uso como son la capa de elevación del terreno o de pendiente, además de las capas de orientación y mapa de sombras, que nos darán una información más visual sobre el relieve de la zona.

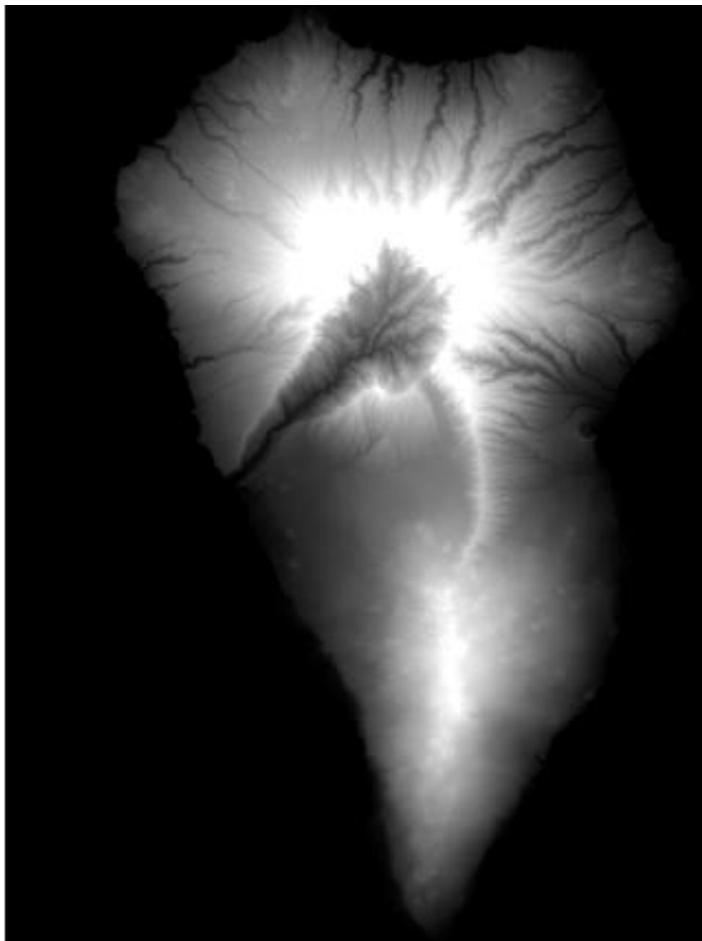


Figura 3-5 Capa MDT isla de La Palma. Elaboración propia

3.3 Obtención de las capas

El proceso de obtención de capas es uno de los pasos más primordiales a la hora de realizar el estudio de optimización del emplazamiento de la base militar, puesto que si no se disponen de los datos pertinentes sobre las variables establecidas, no se podrá realizar el estudio eficientemente.

Al comienzo de la búsqueda, la idea inicial del trabajo era la plantear una comparativa entre una base española que estuviese ya instalada, idealmente en algún país extranjero, y mediante el empleo de métodos SIG, realizar el estudio y comparar, en base a las variables seleccionadas, si dicho emplazamiento era el idóneo o si se podría haber seleccionado una localización más óptima gracias al empleo de estos sistemas.

La base internacional que en los primeros compases del proyecto se pensó para realizar el análisis, era la base conjunta de Adazi situada en Letonia. Esta se trata de una base logística situada en el noroeste de Letonia, en la cual se albergan componentes del Ejército de Tierra, para la misión de apoyo a los países bálticos y Polonia.

Se comenzó buscando por páginas gubernamentales del país, como la Agencia de Información Geoespacial Letona (*Figura 3-6*), o el Centro Estadístico del propio país. A continuación de estar

investigando todas las posibles soluciones y datos que proporcionaba dichas fuentes, se descartó el uso de ellas ya que no proporcionaban todos los datos necesarios para ejecutar el proyecto.

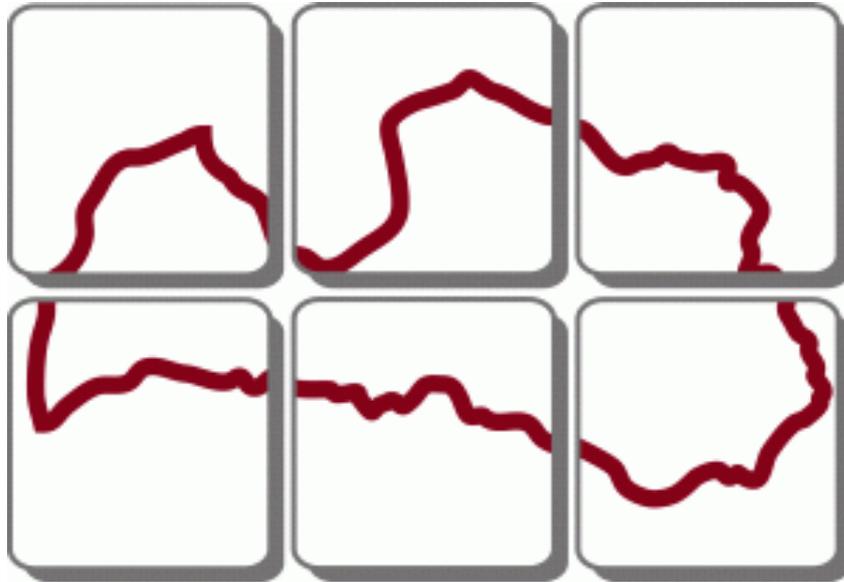


Figura 3-6 Logo Agencia de Información Geoespacial Letona [22]

Una vez descartada la posibilidad de descargar los datos con las direcciones mencionadas en el párrafo anterior, se continuó la búsqueda de posibles enlaces para la descarga de las capas, llegando a una página web que ofrecía gran cantidad de enlaces a distintas fuentes para la posible descarga de gran parte de los datos necesarios [23]. Una vez realizada la búsqueda en dicha página web, no se encuentran todos los datos necesarios para realizar el estudio, ya que solo se consiguen ciertas capas como la de *Distancia a carreteras*, o algunas se consiguieron, pero en formatos no aptos para el programa QGIS.

Por lo tanto, se llegó a la última de las opciones disponibles, la cual se realizó a través del programa QGIS. Dicha opción es denominada Web Map Service (WMS), que permite la obtención de capas a través de una conexión con un servidor, descargando directamente las capas en el programa. Dicho proceso consiste en insertar en la pestaña WMS (*Figura 3-7*) de QGIS la URL del servidor, añadiéndola y por último conectándose; una vez conectado, se selecciona los datos requeridos y se guardan en el proyecto. Debido a falta de posibles enlaces para conectarse a un servidor, esta opción también se descartó. Se siguió intentando buscar en multitud de fuentes, para no desestimar esta idea, pero no se llegó a encontrar ningún enlace que proporcionase una alta fiabilidad de los datos. Llegada la finalización de la búsqueda de posibles medios para la descarga de datos para realizar el estudio del emplazamiento de una base en Letonia, se prosiguió con el problema de la falta de datos, y por lo tanto se descartó dicha opción, replanteando, por lo tanto, una nueva localización para el estudio.

Dado este problema y debido a que el objeto del trabajo es la optimización del emplazamiento, se llegó a la conclusión de que es de mayor prioridad obtener los datos antes que realizarlo en un sitio específico, por lo que se realizó una búsqueda de aquellas páginas que ofrecen la mayor cantidad de datos posibles sobre un lugar, sin importar su localización.

Realizando la búsqueda, se derivó en una página web de la isla de La Palma situada en las Islas Canarias, que ofrece gran parte de las capas necesarias, y, junto con el empleo de otras páginas, se consiguió todas las capas para la realización del estudio.

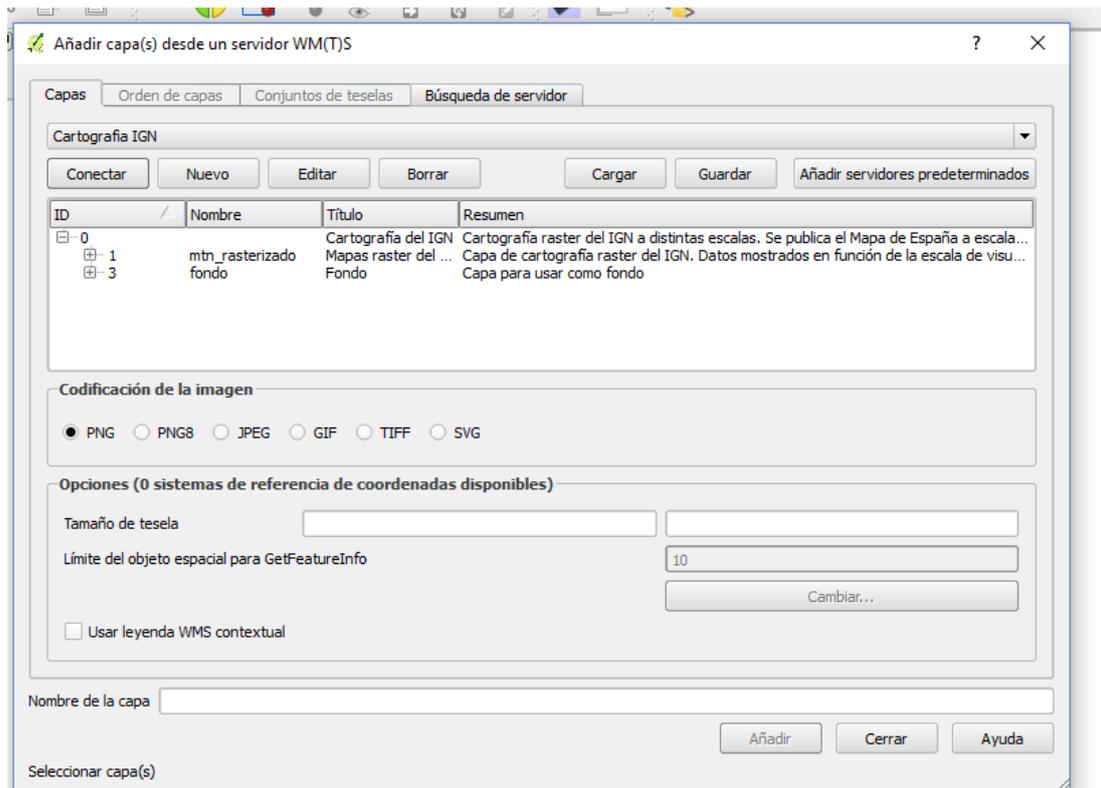


Figura 3-7 Ventana WMS de QGIS. Elaboración propia

El nombre la página es La Palma Open Data [24], la cual fue estudiada, y se observó que contenía una alta cantidad de datos de distintos campos. El siguiente paso fue el de ir extrayendo de ella, todas las capas posibles, ya que algunas tenían cierta información que no era válida y había que realizar un análisis del que se hablará posteriormente. De esta página se extrajeron las siguientes capas:

- Núcleos de población
- Red de carreteras
- Localización de embalses
- Zonas de especial conservación
- Cobertura WiMAX

En un principio, para obtener la capa de elevación, se hizo uso del Centro de Descargas del Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG) [25], pero más tarde, se estableció contacto con la empresa encargada de generar las capas para la isla de La Palma, preguntando por la capa de elevación de la isla, la cual enviaron sin ningún inconveniente; se hizo uso de esta capa en vez de la del CNIG, ya que la para obtenerla había que realizar una combinación de los archivos que proporcionaba, y resultaba en datos que a priori, no parecían tener gran fiabilidad.

A partir de esta información se obtuvo la capa de pendiente, de la que se hablará en el apartado 3.6. Sin embargo, del CNIG sí que se obtuvo la capa de uso de suelos a través del programa CORINE Land Cover, el cual es dirigido por la Agencia Europea del Medio Ambiente para obtener una base de datos europea de ocupación del suelo y de la que se pueda sacar provecho para el análisis territorial y de gestión de políticas europeas [26].

Por último, los límites del terreno fueron obtenidos en una de las páginas extraídas en [23], y de la que se obtuvo una capa con los límites administrativos de la isla.

3.4 Selección de variables para método AHP

En el proceso de seleccionar un emplazamiento para una base militar, siempre ha sido de suma importancia definir el conjunto de variables que van a ser de gran importancia y que influirán con mayor grado, que localización cumple de la mejor manera con las necesidades que llevaron a la realización del estudio. Esta definición de variables es crítica debido a que será lo que determine que el emplazamiento se encuentre en el lugar idóneo y no se cometan errores. Por ejemplo, en caso de estar en territorio enemigo, una variable debería de ser distancia a la que nuestra base debería situarse de las enemigas. Más tarde, se describirán las características que deberán de cumplir estas capas, es decir, que criterios deberán seguir estas variables, para lograr el emplazamiento óptimo de la base militar.

3.4.1 Núcleos de población

La capa de los núcleos de población (*Figura 3-8*) servirá para establecer la distancia a la que nuestra base se debe situar de los núcleos de población. En función del tipo de base se deberá situar a una distancia u otra, pero como norma general, dicha base deberá estar alejadas de zonas de población para poder mantener el factor sorpresa en caso de estar en territorio enemigo, o para poder realizar ejercicios o maniobras sin la preocupación de tener a personal civil rondando por la zona y causando problemas o interrupciones de los mismos.

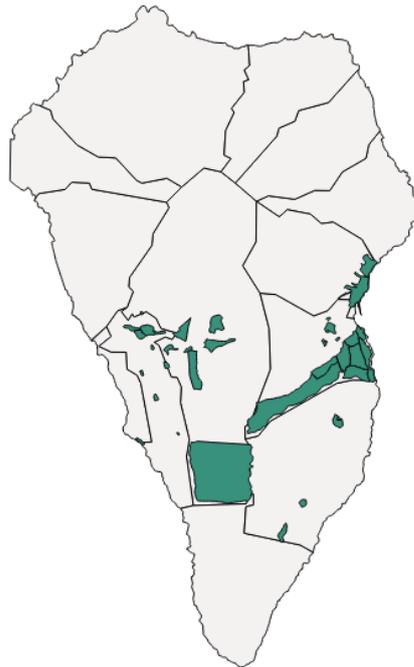


Figura 3-8 Capa Núcleos de población de la isla de La Palma. Elaboración propia

3.4.2 Distancia a carreteras

Otro de los factores claves es la distancia a la que la base militar deberá situarse de las principales líneas de carreteras. Al igual que con las distancias a los núcleos de población, dependiendo del tipo de base se requiera, dicha distancia se verá alterada de una manera u otra. Poniendo el mismo ejemplo que en el apartado anterior, en caso de ser una base en territorio enemigo, se necesitará que se sitúe a una cierta distancia de las principales carreteras, ya que muchos de los núcleos de población se sitúan alrededor de ellas y se perdería el factor sorpresa. En cambio, si se trata de una base militar en territorio propio, podría ser de mayor utilidad que no se situase a una gran distancia de las líneas de carreteras (*Figura 3-9*).



Figura 3-9 Capa carreteras isla de La Palma. Elaboración propia

3.4.3 *Distancia ríos/embalses*

La zona donde estará situada la base deberá estar situada relativamente cerca de puntos de obtención de agua. El agua es un recurso indispensable para el ser humano, y por lo tanto, la base deberá estar situada en una zona cercana a dichos puntos, ya que facilitará la obtención de ella, pero siempre y cuando, la localización de dichas zonas, no sean impedimento para la realización de las operaciones, que es la misión principal que se ha de tener en cuenta (*Figura 3-10*).

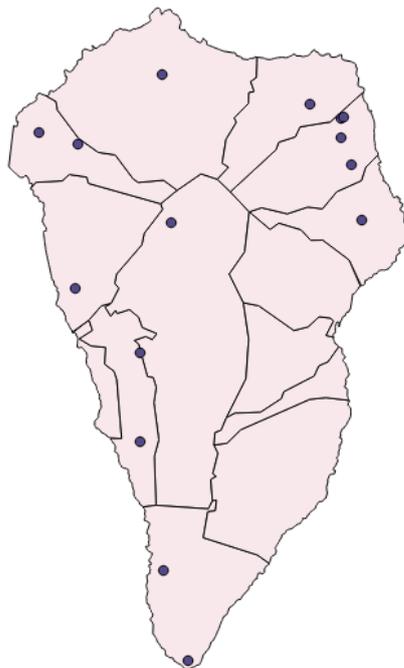


Figura 3-10 Capa de embalses isla de La Palma. Elaboración propia

3.4.4 Elevación del terreno

Esta variable es de especial relevancia para la localización de la base, y juega un papel fundamental cuando se trata de combate contra tropas enemigas. A los comandantes de las unidades se les recomienda que se sitúen en zonas con cierta altura ya que, de esta manera, sería el enemigo el que atacase desde una posición más baja; por lo tanto, combatir desde una posición elevada es más fácil que desde una posición con menor elevación, ofreciendo una gran ventaja junto con un amplio campo de visión, permitiendo una vigilancia de los alrededores de manera efectiva. Otras de las ventajas de combatir desde una posición más elevada, es que los soldados combatiendo desde dicha posición se cansaran menos y el empleo de sus armas será más efectivo ya que serán capaces de llegar más lejos (*Figura 3-11*).

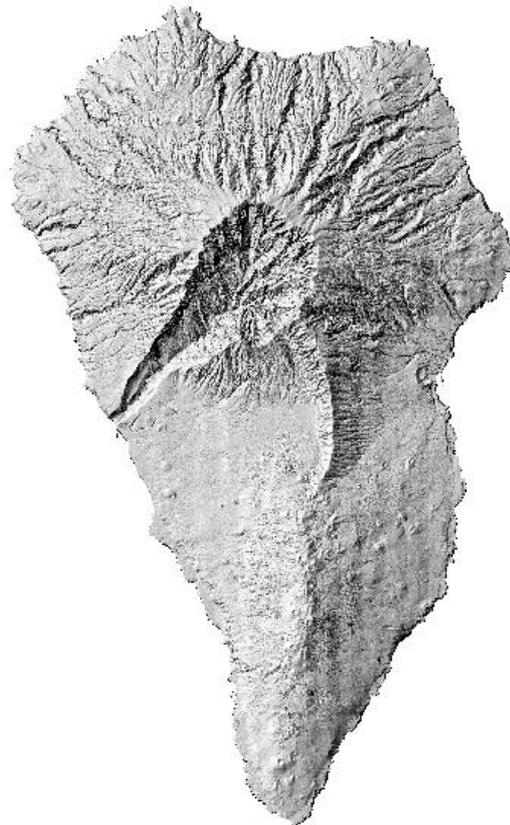


Figura 3-11 Capa elevación isla de La Palma. Elaboración propia

3.4.5 Pendiente

Se tratará de situar la base en una zona donde la pendiente no sea muy pronunciada ya que facilitará el desarrollo de las operaciones, traslados de personal y transporte de vehículos. Este hecho, facilitará su construcción y el desarrollo de las actividades dentro de la misma. Además, cuando se estudien otros casos de selección de diferentes tipos de bases militares, la pendiente tendrá un valor fundamental, como en el apartado 3.11.3, en el cual se estudie la localización de una base aérea militar (*Figura 3-12*).



Figura 3-12 Capa de pendientes isla de La Palma. Elaboración propia

3.4.6 Cobertura WiMAX

El desarrollo de nuevas tecnologías que han sido desarrolladas desde mediados del siglo XX, hace que en la actualidad la información y la comunicación ocupen un lugar privilegiado en nuestra sociedad. En las Fuerzas Armadas este lugar se hace más importante si cabe, ya que en cualquier operación la información proporciona un valioso recurso que debe ser aprovechado. Por lo tanto, es importante mencionar el acceso a cobertura WiMAX, la cual es una tecnología de banda ancha que permite conectarse a la red a través de ondas electromagnéticas en zonas donde la banda ancha tradicional no puede llegar, y además, la posibilidad de establecer radioenlaces que permitan obtener dicha cobertura. Para obtener dicha cobertura, existen dos tipos de bandas: licenciadas, de las cuales, las Fuerzas Armadas poseen bandas reservadas, y libres, que son las de 5 GHz y 2,4 GHz.

Dicho esto, se puede considerar que tener acceso a este tipo de cobertura, en numerosas ocasiones será el punto de inflexión de una victoria o una derrota. Además, esta información, tratada y almacenada debe ser transmitida en momento y lugar adecuado en los distintos niveles del mando. Además, se podría plantear la posibilidad de utilizar este tipo de tecnología para establecer redes punto multipunto con tecnologías LoRaWAN, la cual es una especificación para redes de baja potencia y área amplia, diseñada específicamente para dispositivos de bajo consumo de alimentación, que operan en redes de alcance local, regional, nacionales o globales, para la instalación de sensores de seguridad y vigilancia (*Figura 3-13*) [26].

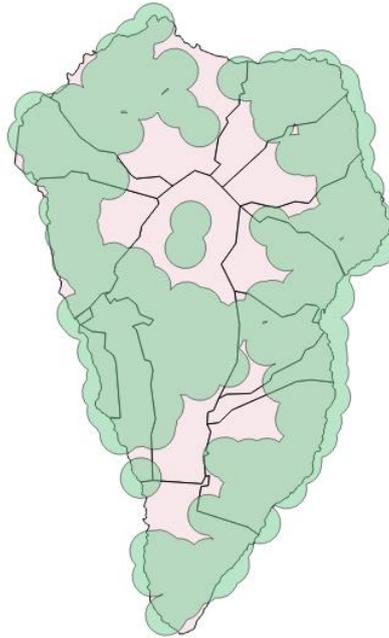


Figura 3-13 Capa de cobertura isla de La Palma. Elaboración propia

3.4.7 Uso de suelos

El uso y tipo de suelos (*Figura 3-14*) serán de especial relevancia a la hora de seleccionar la localización de la base debido a que no cualquier suelo es apto para su construcción y desarrollo de las operaciones. Además de los tipos de suelos, será necesario descartar aquellas zonas que estén bajo algún tipo de protección o que estén reservadas. Este análisis se tratará con mayor profundidad en el apartado 3.6.3.

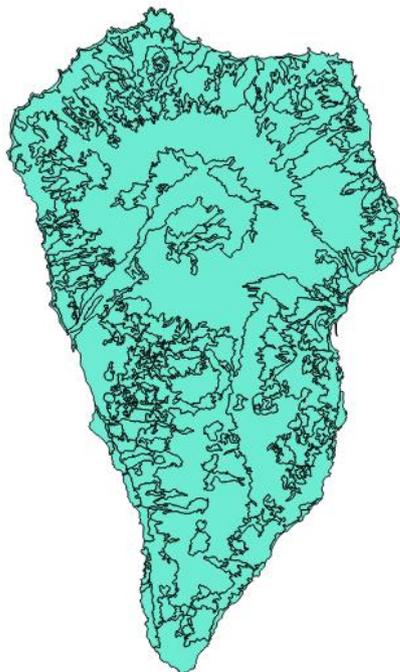


Figura 3-14 Capa Corine Land Cover isla de La Palma. Elaboración propia

3.4.8 Variables excluidas

Además de la lista de variables mencionadas anteriormente, las cuales se han considerado como primordiales, habría que tener en cuenta una serie de zonas en las cuales, el emplazamiento de la base militar estaría restringido. Algunas de estas zonas se corresponden con zonas donde ya existe algún tipo de infraestructura que limite la localización; algunas de estas serían zonas con infraestructura de transporte eléctrico, infraestructura de transporte de gas, logística de hidrocarburos, aeropuertos o con instalaciones ferroviarias. En este caso no fueron incluidas debido de la falta de fuentes fiables y/o capacidad de procesamiento.

3.5 Selección de criterios

Establecidas las variables del estudio, el siguiente paso con el que se procedió fue la generación de los criterios, es decir, dentro de cada capa, que situación es más idónea para lograr una selección lo más óptima posible. Cabe destacar, que en función de que criterio se le asigne a cada capa, ira acompañado de un valor que oscilará entre un 5 y un 1, siendo 5 el valor óptimo y 1 lo contrario. Este valor se usará más tarde, para poder establecer en el programa QGIS, cual tiene mayor importancia a la hora de juntar todas las capas y obtener las distintas alternativas. A continuación, en la *Tabla 3-1*, se encuentran las características que serán detalladas en las siguientes líneas.

Variables	Criterio		
	5	3	1
Distancia a núcleos de población	>3 kilómetros	Entre 1,5 y 3 kilómetros	< 1,5 kilómetros
Elevación	Entre 100 y 250 metros	Entre 250 y 600 metros	>600 metros < 100 metros
Cobertura	Nivel correcto	-	Nivel insuficiente
Distancia a embalses	Entre 1 y 3 kilómetros	> 3 kilómetros	< 1 kilómetro
Distancia a carreteras	Entre 400 y 800 metros	> 800 metros	< 400 metros
Pendiente	< 10 grados	Entre 10 y 20 grados	> 20 grados

Tabla 3-1 Resumen criterios. Elaboración propia

3.5.1 Núcleos de población

La localización de la base tendría que situarse a una distancia mayor de 3 km para obtener un valor de 5. En caso de que la base se situase a una distancia de entre 1.5 km y 3 km, no sería la localización óptima pero no sería una restricción y por lo tanto tendría un valor de 3. Por último, en caso de estar situada a menos de 1.5 km, tendría un valor de 1.

3.5.2 Elevación

En el caso de la elevación, la base debería estar situada entre 100 y 250 metros se le asignaría un valor de 5, debido a que estaría a cierta altura, pero no a una altura excesiva que impidiese en gran

medida el acceso a ella. En caso de situarse entre los 250 metros y los 600, recibiría un valor de 3. Si se situase por debajo de los 100 metros o por encima de los 600, se le asignaría un valor de 1, restringiendo dichas localizaciones.

3.5.3 Cobertura WiMAX

La cobertura que tendría que tener la base militar sería de un nivel correcto, como se puede apreciar en la *Figura 3-21*. En caso de que tuviese dicho nivel se le asignaría un valor de 5 y en caso contrario, recibiría un valor de 1.

3.5.4 Distancia a embalses

Como se comentó anteriormente, la base militar tendría que estar a una distancia no muy considerable una fuente de agua. Por lo tanto, se estableció que un valor de 5 sería dado si la base se encuentra entre 1 y 3 km de un embalse. Si se encontrase a una distancia de menos de 1 km se le daría un valor de 1 ya que podría influir en el transcurso de las operaciones. Por último, si la base se sitúa a una distancia mayor a 3 km se le asignaría un valor de 3.

3.5.5 Distancia a carreteras

La base militar debería de estar situada a cierta distancia de las carreteras para no perder el factor sorpresa, pero no a gran distancia que restrinja el acceso a ella. Debido a esto, si la base se localizase a una distancia de entre 400 y 800 metros de una red principal de carreteras, se le asignaría un valor de 5; si estuviese a una distancia mayor de estos 800 metros, recibiría un valor de 3 y por último si estuviese a menos de 400 metros obtendría un valor de 1.

3.5.6 Pendiente

La pendiente idónea que la base debería tener estaría entre los 0 y 10° de pendiente, obteniendo así, un valor de 5. Si sobrepase estos 10° pero no superase los 20° tendría un valor de 3 y pasado este valor, obtendría un valor de 1.

3.5.7 Corine y zonas de especial conservación

En este caso, una vez que se obtenga la capa final implementando los valores y pesos correspondientes, habría que eliminar aquellas zonas que recaigan fuera de los tipos de suelos no permitidos en caso de la capa del Corine, y aquellas zonas que recaigan dentro de las zonas de especial conservación.

3.6 Análisis de las capas

Terminando el proceso de obtención de capas y establecida la localización que se estudiará, se procedió al análisis de las capas. Dicho proceso consiste en filtrar, generar y añadir información de alguna de las capas obtenidas en el paso anterior, para que a continuación se pueda aplicar el método del análisis multicriterio para seleccionar el emplazamiento óptimo.

3.6.1 Capa núcleos de población

Para la realización del análisis de esta capa fue necesario el uso de la capa de Municipios de Población [24]. Lo que se pretendía en este análisis era eliminar aquellas zonas de todo el territorio donde el número de población fuese significativo, pudiendo descartar zonas donde sería inviable la construcción de la base militar.

En la *Figura 3-15* se puede observar la división de territorios por la que está constituida la isla de La Palma, en función de los núcleos de población que la constituye. A continuación, se introdujo la capa

de los municipios de población (*Figura 3-16*) de la isla. Una vez introducidas las dos capas, se realizó un filtrado de aquellos municipios que dispongan de un número de población menor de 4800 habitantes, ya que se consideraba que poblaciones con una cifra menor a esta, no se constituían una limitación para la construcción de la base militar. Esta operación se realizó observando la tabla de atributos de la capa (*Figura 3-17*); dicha tabla contempla todos los datos de las características que ofrece la capa, dividida en función de los distintos polígono, líneas o puntos que la componen y las características de cada uno de estos.

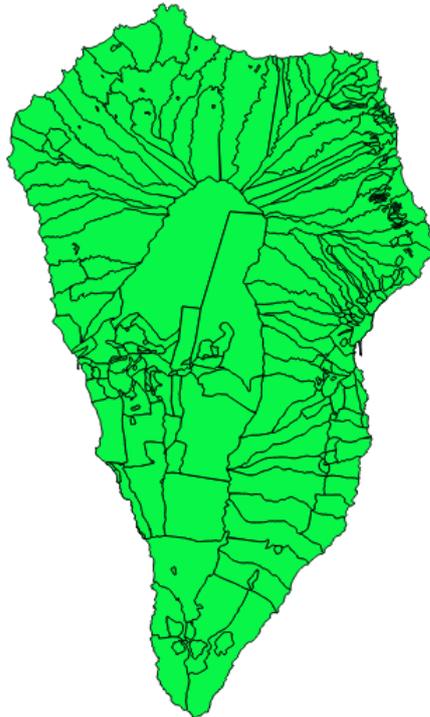


Figura 3-15 División de Territorios isla de La Palma. Elaboración propia



Figura 3-16 Municipios de La Palma. Elaboración propia

OBJECTID	SUPERFICIE	PERIMETRO	ID	MUNICIPIO	CODIGO	MUNICIPIOS	A2013	A2012	CENSOS_011	A2011	A2010	A2009	A
1	135741394.2676...	66918.00237000...	1	EL PASO	38027	Paso (E)	7928	7874	7665	7947	7837	7815	
2	43225930.07200...	33315.12529799...	2	SANTA CRUZ DE ...	38037	Santa Cruz de La...	16330	16705	16568	16924	17128	17084	
3	30840212.15592...	29944.15251999...	3	BREÑA ALTA	38008	Breña Alta	7455	7298	7173	7344	7347	7337	
4	11670782.92484...	24105.88963900...	4	TAZACORTE	38045	Tazacorte	4911	4957	4777	5559	5697	5755	
5	56215953.43962...	53288.24509299...	5	FUENCALIENTE	38014	Fuencaliente	1798	1840	1841	1905	1898	1935	
6	35821971.38703...	44594.48700300...	6	LOS LLANOS DE ...	38024	Llanos de Ardan...	20930	20895	20493	21145	20948	20766	
7	53807112.67776...	40228.73434200...	7	TIJARAFE	38047	Tijarafe	2776	2765	2675	2763	2769	2768	
8	30816668.76247...	39191.38916500...	8	PUNTAGORDA	38029	Puntagorda	2057	1940	1730	2028	2177	2108	
9	42648038.59911...	35852.51602899...	9	SAN ANDRÉS Y S...	38033	San Andrés y Sa...	4473	4637	4578	4860	4874	4884	
10	14387396.46524...	33784.99290099...	10	BREÑA BAJA	38009	Breña Baja	5523	5492	5323	5348	5259	5115	
11	70407418.92711...	47350.79927899...	11	VILLA DE MAZO	38053	Villa de Mazo	4858	4898	4826	4986	4955	4802	
12	43629381.69197...	44752.79952600...	12	BARLOVENTO	38007	Barlovento	2085	2085	2067	2231	2296	2363	
13	102686124.7072...	64439.43512000...	13	GARAFÍA	38016	Garafía	1645	1654	1566	1707	1714	1804	
14	35052095.84762...	40532.77618500...	14	PUNTALLANA	38030	Puntallana	2346	2428	2407	2416	2425	2460	

Figura 3-17 Tabla de Atributos Municipios de la isla de La Palma. Elaboración propia

En la tabla de atributos, se seleccionó la herramienta de *Seleccionar/filtrar objetos usando formulario* y a continuación en la columna de *Censos_011* se estableció un criterio de menor a 4800 habitantes, marcando aquellos objetos que cumplían ese requisito y se eliminaron, dejando como resultante la capa que aparece en la *Figura 3-18*.



Figura 3-18 Municipios filtrados isla de La Palma. Elaboración propia

El siguiente paso fue el de seleccionar aquellos núcleos donde se concentraban la mayor parte de los habitantes en los municipios anteriormente filtrado. Para realizar esta operación, se requirió el uso de la herramienta corte. Se filtró primero la capa de núcleos de población, seleccionando de la tabla de atributos, aquellos territorios que en la columna de *Cod_Núcleo* tuviesen un valor de 1, debido a que dichos núcleos son donde hay una mayor concentración de habitantes. A continuación, se realizó una

operación de corte entre la capa de núcleos de población ya filtrada y la capa de municipios filtrada, dando por consiguiente la capa que se muestra a continuación (Figura 3-19).

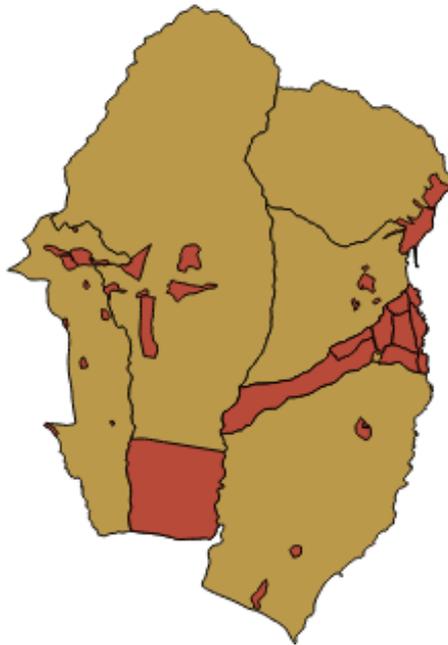


Figura 3-19 Núcleos de población seleccionados isla de La Palma. Elaboración propia

3.6.2 Capa de pendiente

Debido a que la capa de elevación ya se obtuvo como se relata en el apartado 3.3, se hablará a continuación como se consiguió la capa de pendiente a raíz de la de elevación. Existen dos maneras de realizar dicha operación. La primera es mediante el complemento de *Análisis de Terreno*, donde se introdujo la capa de elevación, se seleccionó la pestaña de *Pendiente* (Figura 3-20), y se generó la nueva capa, dando valores de la pendiente en grados.

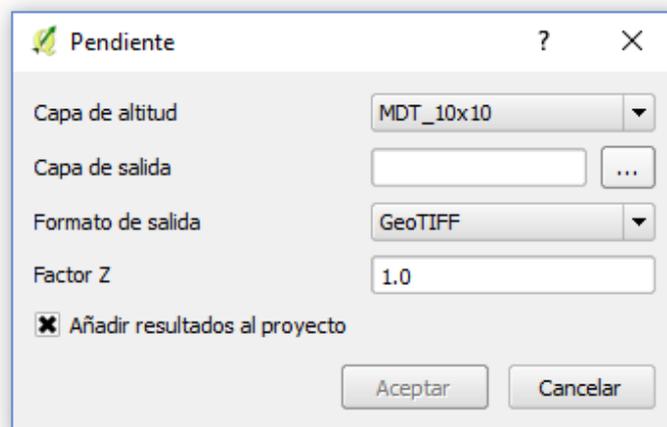


Figura 3-20 Análisis de Terreno – Pendiente. Elaboración propia

También se podía realizar esta operación mediante la pestaña *Análisis*, en la herramienta *MDT* que permite, al igual que la anterior, generar un mapa de pendientes, pero en este caso, también permitía generar la capa con valores de la pendiente en porcentaje.

3.6.3 Capa Corine Land Cover

A continuación, se realizó el análisis de la capa de uso de suelos. En este paso, lo primero que se realizó fue un cortado de la capa proporcionada por el CNIG, debido a que esta, englobaba toda la zona de las Islas Canarias, y se usó la herramienta *Cortar*, para seleccionar solo los datos de la isla de La Palma.

A continuación, se eliminó aquellas zonas que tenían unas características de suelo que no convenían para la construcción de la base militar. Para llevar a cabo el filtrado de la capa, se hizo uso del documento proporcionado por CNIG, donde venía especificado la fraseología usada en la tabla de atributos de la capa, descifrando el significado de la columna de *CODE_12*.

De los distintos usos de suelos, fueron eliminados los siguientes:

- Tejidos urbanos
- Zonas industriales, comerciales y de transporte
- Zonas de extracción minera, vertederos y de construcción
- Zonas verdes artificiales, no agrícolas
- Bosques frondosos y de coníferas
- Zonas de roquedo, playas, dunas y arenales

.La tabla completa con todos los tipos de suelo se puede ver en la *Tabla 3-2*.

NIVEL 1	NIVEL 2	NIVEL 3
1.SUPERFICIES ARTIFICIALES	1.1 Tejido urbano	1.1.1 Tejido urbano continuo
		1.1.2 Tejido urbano discontinuo
	1.2 Zonas industriales, comerciales y de transportes	1.2.1 Zonas industriales o comerciales
		1.2.2 Redes viarias, ferroviarias y terrenos asociados
		1.2.3 Zonas portuarias
		1.2.4 Aeropuertos
	1.3 Zonas de extracción minera, vertederos y de construcción	1.3.1 Zonas de extracción minera
		1.3.2 Escombreras y vertederos
	1.4 Zonas verdes artificiales, no agrícolas	1.3.3 Zonas de construcción
		1.4.1 Zonas verdes urbanas
	2.1 Tierras de labor	1.4.2 Instalaciones deportivas y recreativas
		2.1.1 Tierras de labor en seco
		2.1.2 Terrenos regados permanentemente
		2.1.3 Arrozales

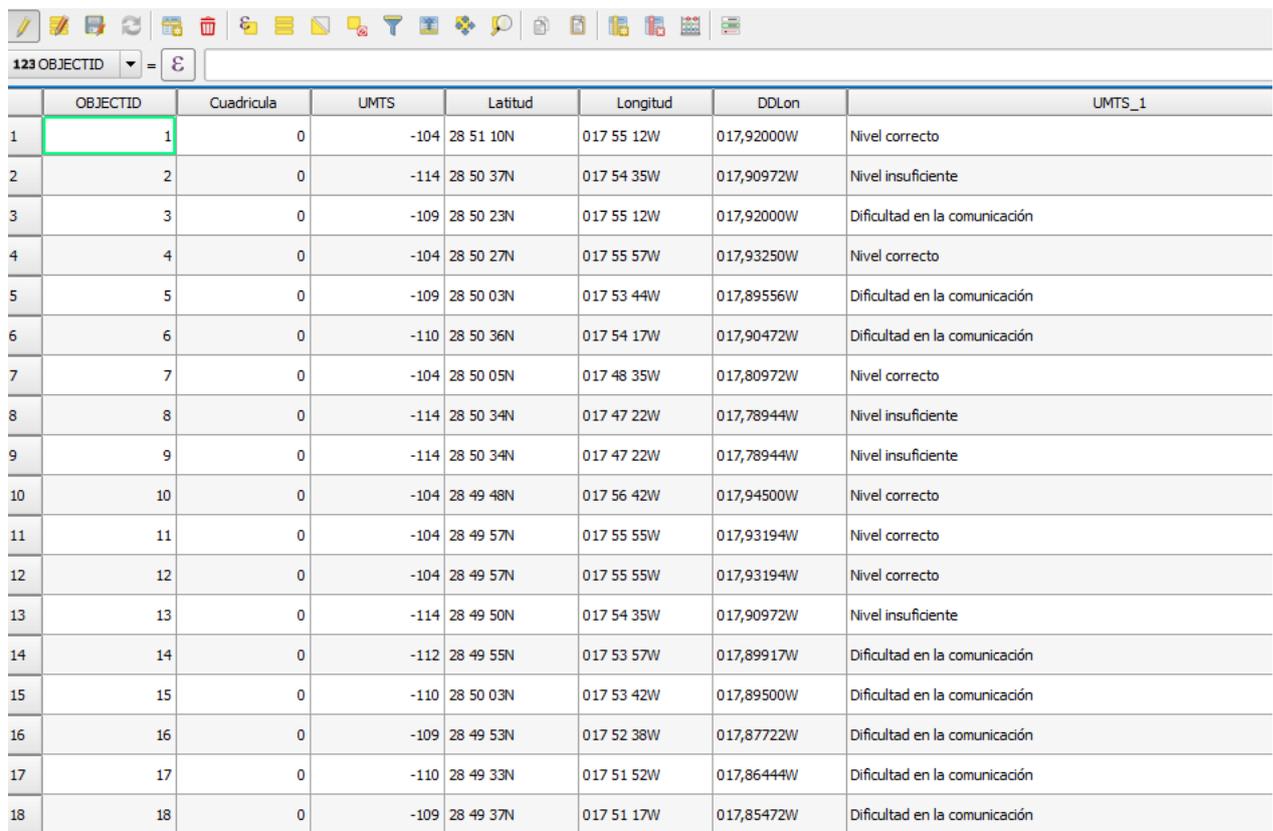
2.ZONAS AGRÍCOLAS	2.2 Cultivos permanentes	2.2.1 Viñedos
		2.2.2 Frutales
		2.2.3 Olivares
	2.3 Praderas	2.3.1 Praderas
	2.4 Zonas agrícolas heterogéneas	2.4.1 Cultivos anuales asociados con cultivos permanentes
		2.4.2 Mosaico de cultivos
		2.4.3 Terrenos principalmente agrícolas, pero con importantes espacios de vegetación natural
2.4.4 Sistemas agroforestales		
3. ZONAS FORESTALES CON VEGETACIÓN NATURAL Y ESPACIOS ABIERTOS	3.1 Bosques	3.1.1 Bosques de frondosas
		3.1.2 Bosques de coníferas
		3.1.3 Bosque mixto
	3.2 Espacios de vegetación arbustiva y/o herbácea	3.2.1 Pastizales naturales
		3.2.2 Landas y matorrales
		3.2.3 Vegetación esclerófila
		3.2.4 Matorral boscoso de transición
	3.3 Espacios abiertos con poca o sin vegetación	3.3.1 Playas, dunas y arenales
		3.3.2 Roquedo
		3.3.3 Espacios con vegetación escasa
		3.3.4 Zonas quemadas
		3.3.5 Glaciares y nieves permanentes
4. ZONAS HÚMEDAS	4.1 Zonas húmedas continentales	4.1.1 Humedales y zonas pantanosas
		4.1.2 Turberas
	4.2 Zonas húmedas litorales	4.2.1 Marismas
		4.2.2 Salinas
		4.2.3 Zonas llanas intermareales
5.SUPERFICIES DE AGUA	5.1 Aguas continentales	5.1.1 Cursos de agua
		5.1.2 Láminas de agua
	5.2 Aguas marinas	5.2.1 Lagunas costeras
		5.2.2 Estuarios
		5.2.3 Mares y océanos

Tabla 3-2 Uso de suelos Corine [27]

3.6.4 Capa Cobertura WiMAX

Como ya se estableció en el apartado 3.4.6, en la actualidad, es imprescindible la cobertura de banda ancha en las operaciones, por lo tanto se extrajo de la página web de La Palma [24], una capa con aquellas zonas donde la cobertura de internet tuviese un nivel correcto y que no sufriese interferencias que pudiesen perturbar las comunicaciones durante el desarrollo de la operación.

Lo que se realizó durante el procesado de esta capa, fue la eliminación de aquellos puntos de la isla donde la cobertura no superase el umbral mínimo necesario. Dicha operación se llevó a cabo filtrando de la tabla de atributos de la capa, aquellos puntos que tuviesen un valor *Dificultad en la comunicación* o *Insuficiente* como se puede observar en la *Figura 3-21*.



	OBJECTID	Cuadrícula	UMTS	Latitud	Longitud	DDLon	UMTS_1
1	1	0	-104	28 51 10N	017 55 12W	017,92000W	Nivel correcto
2	2	0	-114	28 50 37N	017 54 35W	017,90972W	Nivel insuficiente
3	3	0	-109	28 50 23N	017 55 12W	017,92000W	Dificultad en la comunicación
4	4	0	-104	28 50 27N	017 55 57W	017,93250W	Nivel correcto
5	5	0	-109	28 50 03N	017 53 44W	017,89556W	Dificultad en la comunicación
6	6	0	-110	28 50 36N	017 54 17W	017,90472W	Dificultad en la comunicación
7	7	0	-104	28 50 05N	017 48 35W	017,80972W	Nivel correcto
8	8	0	-114	28 50 34N	017 47 22W	017,78944W	Nivel insuficiente
9	9	0	-114	28 50 34N	017 47 22W	017,78944W	Nivel insuficiente
10	10	0	-104	28 49 48N	017 56 42W	017,94500W	Nivel correcto
11	11	0	-104	28 49 57N	017 55 55W	017,93194W	Nivel correcto
12	12	0	-104	28 49 57N	017 55 55W	017,93194W	Nivel correcto
13	13	0	-114	28 49 50N	017 54 35W	017,90972W	Nivel insuficiente
14	14	0	-112	28 49 55N	017 53 57W	017,89917W	Dificultad en la comunicación
15	15	0	-110	28 50 03N	017 53 42W	017,89500W	Dificultad en la comunicación
16	16	0	-109	28 49 53N	017 52 38W	017,87722W	Dificultad en la comunicación
17	17	0	-110	28 49 33N	017 51 52W	017,86444W	Dificultad en la comunicación
18	18	0	-109	28 49 37N	017 51 17W	017,85472W	Dificultad en la comunicación

Figura 3-21 Tabla de atributos capa Cobertura. Elaboración propia

Una vez ejecutado el filtrado, se obtuvo la capa que muestra aquellas zonas donde la cobertura WiMAX es idónea para realizar las operaciones. Habría que especificar si la conexión se realizaría mediante radioenlace o par de cobre. En este caso no se pudo especificar debido a la falta de información disponible Comisión Nacional de Telecomunicaciones.

3.7 Aplicación AHP

3.7.1 Implementación del método

Realizado el procesado de las capas, para su posterior utilización para obtener la localización óptima del emplazamiento, se pasó al siguiente paso, el cual es de gran importancia debido a que en este paso se estableció que capas tenían mayor relevancia con respecto a otras y cuáles serán más determinantes a la hora de establecer la localización de la base. Se empezó estudiando el método AHP, y como se podría implementar a este trabajo. La aplicación del método AHP se utiliza para realizar, como normal

general, una selección dentro de diferentes alternativas en función de una serie de criterios como se explica en el apartado 2.3.2. Dicho método se define por lo tanto como una técnica estructurada la cual organiza y analiza decisiones complejas basadas en matemáticas y psicología, por lo que dicho método se realizará a través de un diagrama de flujos dividida en nueve pasos (*Figura 3-22*).

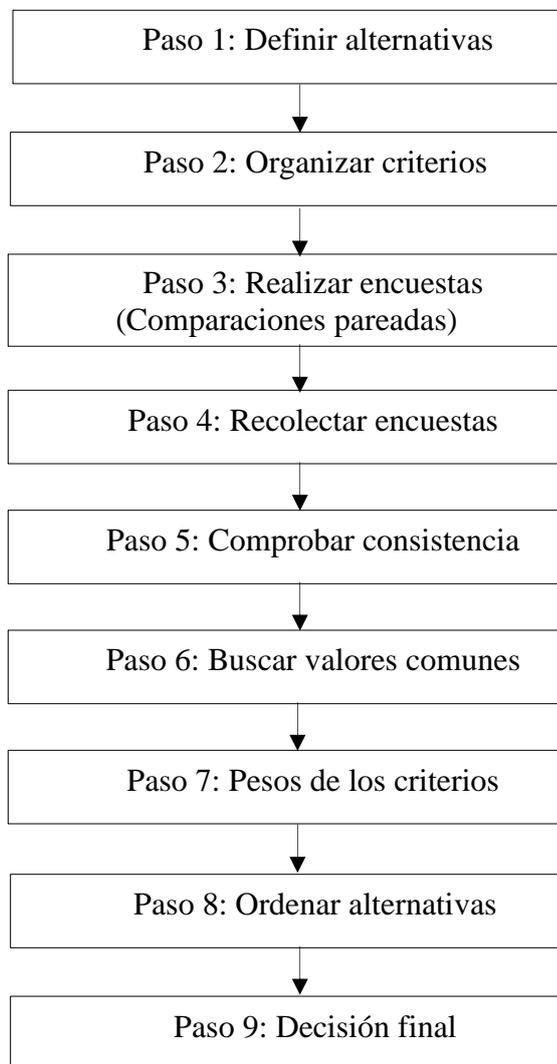


Figura 3-22 Proceso AHP [11]

En el caso de este trabajo, se tuvo que adaptar el método AHP debido a que lo que se intenta averiguar son las alternativas que cumplen mejor con los criterios, pero sin disponer de dichas alternativas en un principio. Por lo tanto, los pasos que se siguieron fueron los siguientes:

1. Se comenzó estableciendo las variables que influyen en la selección del emplazamiento y que fue realizado en el apartado 3.4.
2. Una vez establecidas, se pasó a formular los criterios dentro de estas para su posterior implementación en el proceso de selección.
3. Como se puede observar en la figura anterior, se tendría que realizar una encuesta entre varios expertos para realizar la matriz de comparaciones pareadas. En el caso de este trabajo, se realizó una única matriz (*Tabla 3-3*), en la cual se compara una variable con otra dándoles pesos en función de si una de ellas tiene mayor importancia que la otra.
4. Una vez realizada la matriz, se comprobó su consistencia, midiendo el ratio de consistencia, que se explicará con mayor detalle a continuación.

5. Una vez obtenido el ratio de consistencia, y comprobado que este estaba por debajo del límite máximo permitido, se procedió al cálculo de los pesos de cada una de las variables y que se introducirán en el programa una vez se obtengan todas las capas finales, para establecer la importancia que tiene cada capa en la selección del emplazamiento.

	Núcleos de población	Elevación	Cobertura	Distancia a embalses	Distancia a carreteras	Pendiente
Núcleos de población	1,00					
Elevación		1,00				
Cobertura			1,00			
Distancia a embalses				1,00		
Distancia a Carreteras					1,00	
Pendiente						1,00
TOTAL						

Tabla 3-3 Matriz de comparación pareada inicial. Elaboración propia

6. Por último, una vez obtenidos los pesos, e implementados en el programa, se creará una capa que estará formada por una suma de todas y generando de esta manera, aquellos sitios que cumplen en mayor grado, los requisitos establecidos para conseguir el emplazamiento óptimo de una base militar.

3.7.2 Escala de Saaty

Cuando se generó la matriz de comparación pareada, fue necesario rellenarla siguiendo una escala que establezca que criterio es más importante cuando se comparan entre ellos. Para conseguir esto se utilizó la Escala de Saaty [12]. Dicha escala (*Tabla 3-4*) establece unos rangos de valores para determinar si un criterio es más, menos o igual de importante que otro.

Escala numérica	Escala Verbal
1	Ambos criterios o elementos son de igual importancia
3	Débil o moderada importancia de uno sobre el otro
5	Importancia esencial o fuerte de un criterio sobre el otro
7	Importancia demostrada de un criterio sobre otro
9	Importancia absoluta de un criterio sobre otro
2, 4, 6, 8	Valores intermedios entre dos juicios adyacentes, que se emplean cuando es necesario un término medio entre dos de las intensidades anteriores
2	Entre igualmente y moderadamente preferible
4	Entre moderadamente y fuertemente preferible
6	Entre fuertemente y extremadamente preferible
8	Entre muy fuertemente y extremadamente preferible

Tabla 3-4 Escala de Saaty [12]

Un ejemplo sería, si la relación entre el criterio A y el criterio B es 3, entonces la relación entre B y A sería de 1/3. La matriz de comparación está compuesta por el mismo número de filas que de columnas, donde los resultados se guardan en un lado de la diagonal, y en dicha de diagonal se almacenan valores iguales a 1.

3.7.3 Ratio de consistencia

Uno de los problemas que ofrece el método AHP es que a veces se pueden producir inconsistencias; por lo tanto, se establece una proporción de consistencia para comprobar que las comparaciones realizadas se encuentran dentro de unos límites establecidos sin que se produzcan inconsistencias. Para que se pudieran resolver todas estas situaciones, Saaty estableció una medida, llamado ratio de consistencia (RC), que involucra el valor del índice de consistencia (IC), que se calcula de la siguiente manera:

$$IC = \frac{\lambda_{max} - m}{m - 1}$$

Donde, λ_{max} , que es la suma de los valores de la matriz que resulta de la multiplicación de la matriz de comparación pareada por los pesos obtenidos en la matriz normalizada, y m es el número de alternativas comparadas. Además, también definió el valor del índice de consistencia aleatoria (IA), que se puede hallar usando la *Tabla 3-5*.

<i>m</i>	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>RI</i>	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.51

Tabla 3-5 Valores de IA. Elaboración propia

Para que el valor de RC fuese aceptable, dicho valor tendría que ser menor a 0.1, y se halla usando la ecuación siguiente:

$$RC = \frac{IC}{IA}$$

Todo este proceso, se explicará más adelante en el apartado 3.10.3, donde se realizará el cálculo del CR del ejemplo estudiado.

3.8 Asignación de valores

Para generar en el programa los criterios establecidos para las variables, se necesitó de la creación de buffers de las capas para dividir las y poder asignarles el valor correspondiente según el criterio. No obstante, esta operación únicamente se realizó con las capas vectoriales, ya que no se pueden generar buffers para capas ráster.

Los buffers, con su valor implementado, sirvieron para establecer aquellas área, dentro cada variable, se cumplían con mayor o menor grado. Dichos buffers se realizaron con la herramienta *Buffer* (*Figura 3-23*), ya comentada en el apartado 3.2.3, y cuya ventana se muestra en la *Figura 3-24*.

Dicha herramienta se sitúa en la pestaña *Vectorial*, dentro del apartado *Herramientas de geoprocreso*. Una vez se selecciona la herramienta se abre el cuadro correspondiente. Dentro del cuadro es necesario seleccionar la capa de la cual se quiere generar el buffer, que tamaño va a tener dicho buffer y por último seleccionar donde se quiere guardar el archivo o si solo se quiere crear una capa temporal.

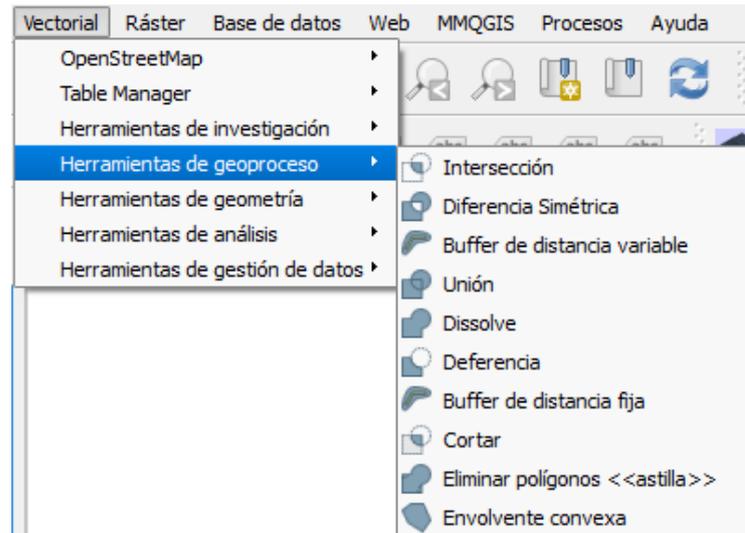


Figura 3-23 Menú buffer. Elaboración propia

La otra herramienta que se usó para asignar a una capa distintos, valores fue la herramienta *r.reclass*, dentro de las herramientas *GRASS*. Dicha herramienta lo que permite es generar una nueva capa a partir de una capa ráster, asignándole valores en función de unos requerimientos implementados. Dichos requerimientos tuvieron que ser escritos en un archivo *.txt*, que posteriormente se introdujo en la pestaña de la herramienta. Al igual que la herramienta *Buffer*, se tuvo que seleccionar la capa que se quería reclasificar, introducir el archivo donde vienen escritos los requisitos para reclasificar la capa junto con los valores asignados a cada una de las nuevas categorías creadas y seleccionar el lugar donde se quería guardar la capa generada. Esta herramienta es de gran utilidad para aquellas capas ráster en las cuales existen una gran cantidad de datos y que son difíciles de procesar.

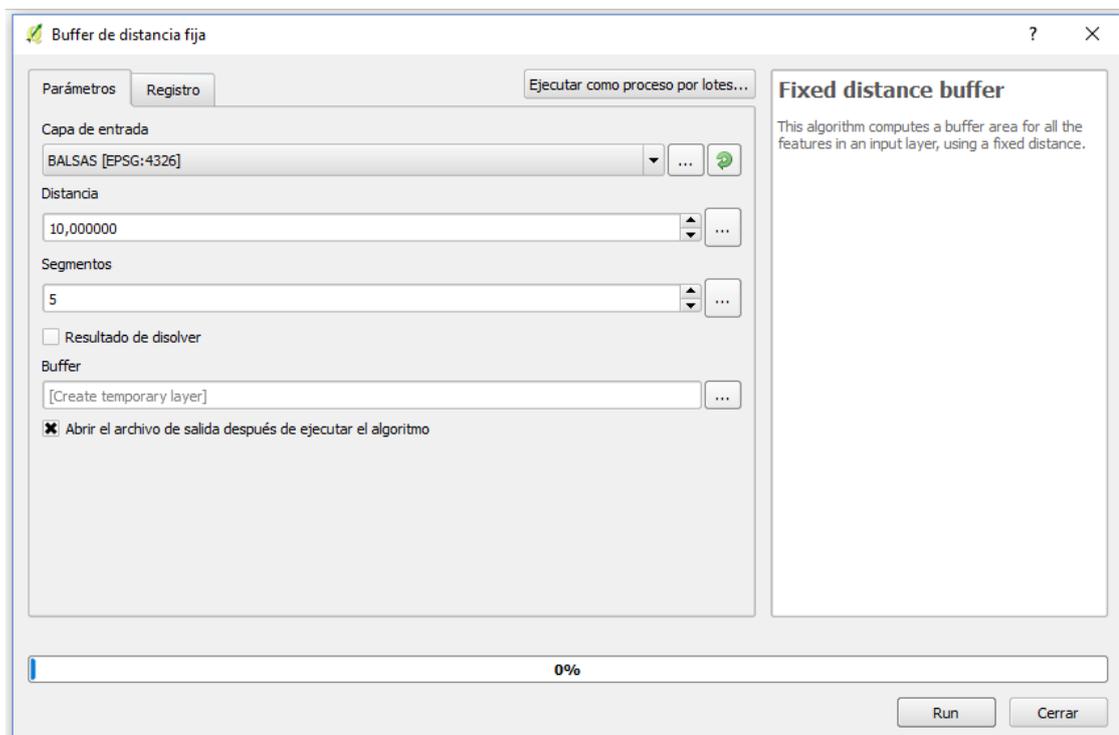


Figura 3-24 Ventana buffer de distancia. Elaboración propia

3.8.1 Distancia a núcleos de población

Para hallar las áreas de influencia según los distintos criterios de la variable de distancia a núcleos de población se usó la herramienta *Buffer*. En este caso, se realizaron tres buffers debido a los tres criterios que se establecieron anteriormente.

Esta operación requirió más procesado que el simple hecho de usar la herramienta *Buffer*. Fue necesario el uso de la herramienta *Diferencia*, debido a que, al generar los buffers de los distintos criterios, estos se solapaban entre sí, resultando en una obtención errónea de la capa, y que posteriormente, en la realización de las capas ráster, darían lugar a error, sumándose valores entre sí, y por lo tanto, no se generaría la localización óptima del emplazamiento.

Para asignar los valores a las capas, se hizo uso de la *tabla de atributos* y de las diferentes herramientas que proporciona. Una vez abierta, se seleccionó la herramienta *Calculadora de campos* (Figura 3-25). Esta herramienta permite realizar cambios y varias operaciones a los distintos campos existentes. Además, permite generar un nuevo campo directamente a través de ella, que fue lo que se llevó a cabo, generando un nuevo campo llamado *Valor* y en el cuadro de texto, se escribió el valor deseado según el criterio.

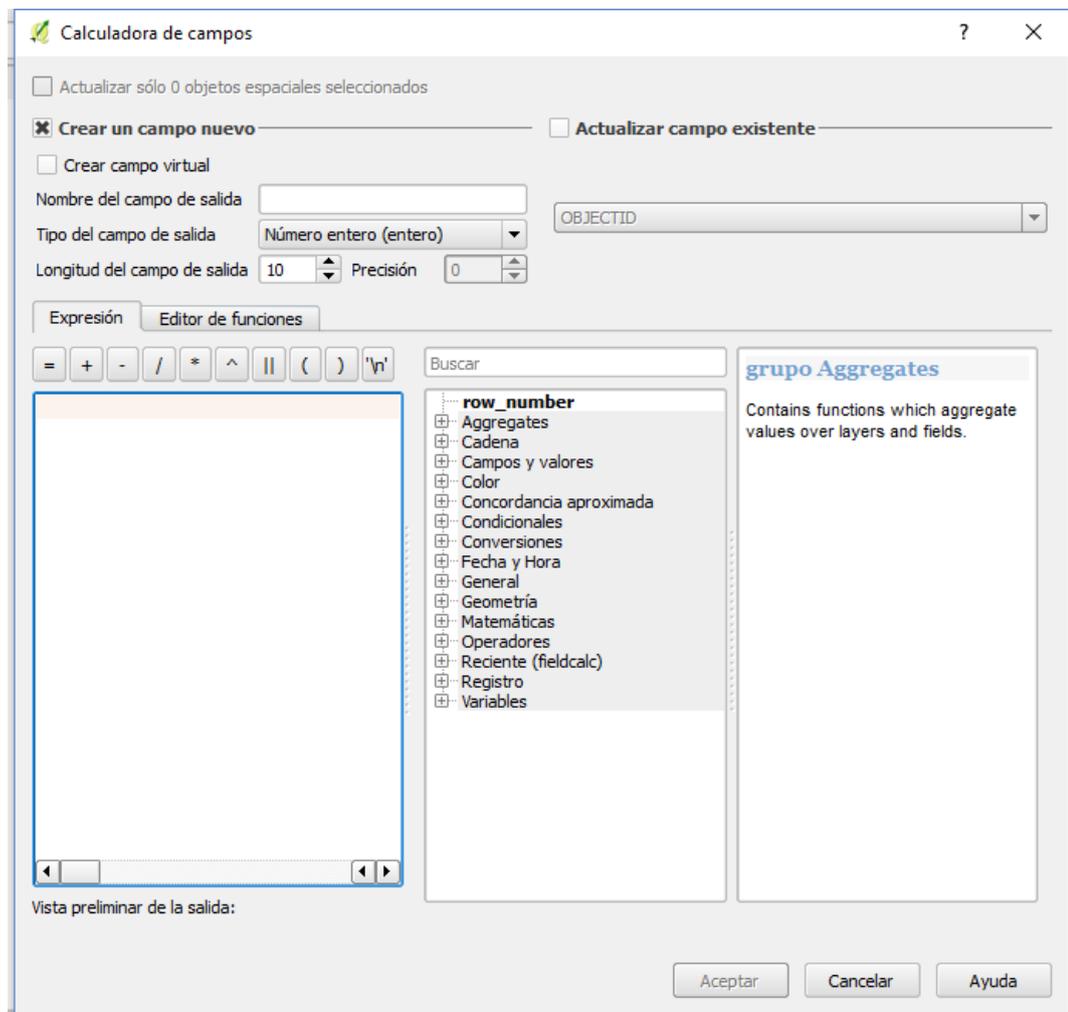


Figura 3-25 Calculadora de campos. Elaboración propia

Dicho esto, se empezó a generar los buffers para los distintos criterios. El primero de ellos fue el buffer de una distancia de 1.5 kilómetros que obtuvo un valor de 1. A continuación se generó un buffer de 3 kilómetros para establecer el área comprendida entre 1.5 y 3 kilómetros con un valor de 3; para este

buffer se usó la herramienta *Diferencia* como se comentó anteriormente. Y por último se generó el buffer para el criterio de una distancia mayor de 3 kilómetros asignándole un valor de 5. En el último buffer, debido a que no existe la posibilidad de realizar un buffer equivalente a una función mayor o igual, lo que se realizó fue un buffer lo suficientemente grande para que cubriese el territorio, y a continuación, se usó la herramienta *Corte*, junto con la capa *Limite insular*, de manera que el buffer solo ocupase esta forma, además de eliminar aquellas zonas ocupadas por los otros buffer (*Figura 3-26*).

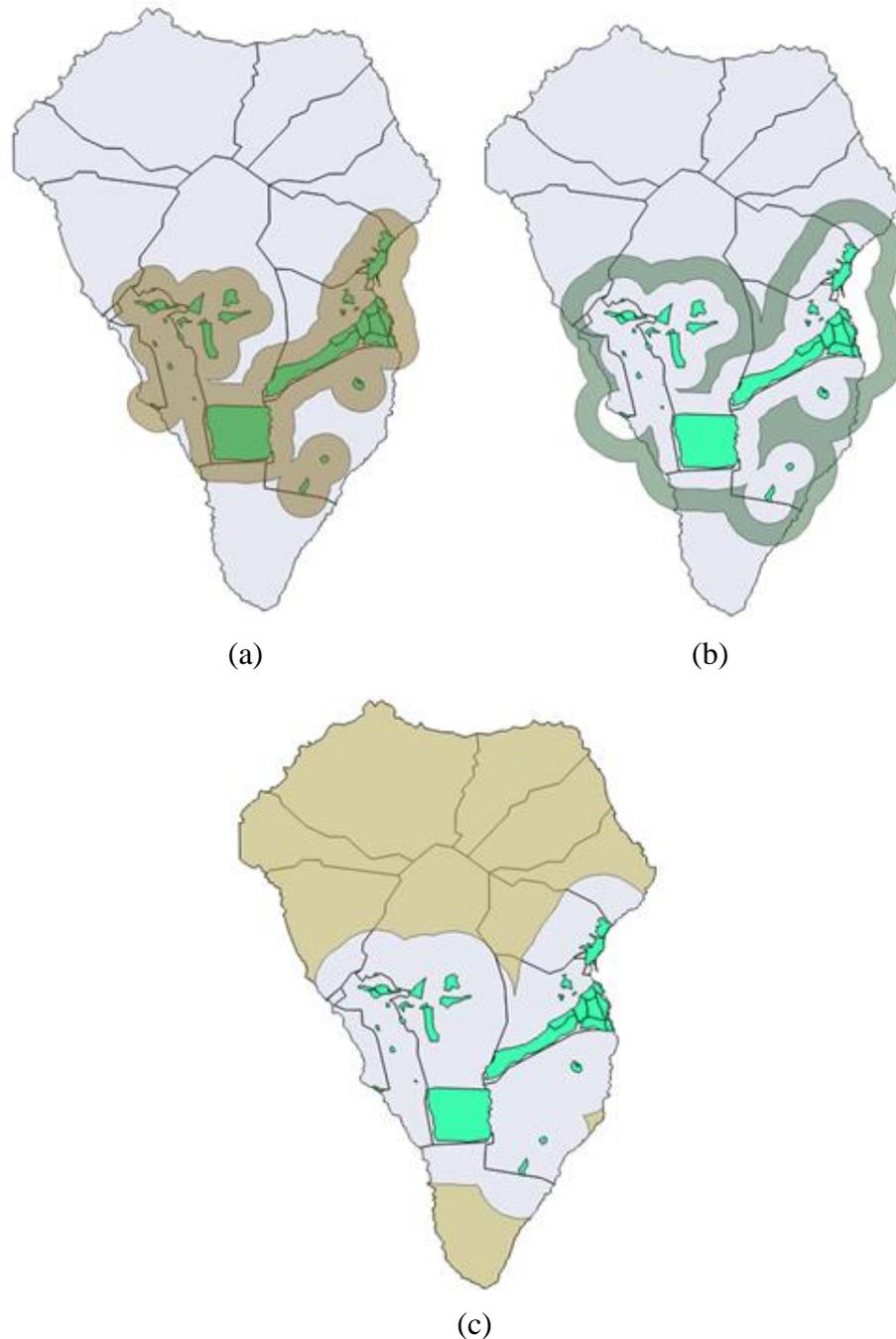


Figura 3-26 Población: (a) Criterio valor 1; (b) Criterio valor 3; (c) Criterio valor 5. Elaboración propia

Como se puede observar en las figuras, parte de estas capas sobresalen del territorio, por lo tanto, se realizó una corte de aquellas zonas usando la capa *Limite insular*, para que cuando se rastericen y se

junten las capas, no se contemplen zonas que estén fuera de la isla. Esta operación se realizó en las capas de valor 1 y 3, resultando en las capas que se ven en la *Figura 3-27*. En la *Figura 3-28* se puede apreciar los tres buffers unidos.

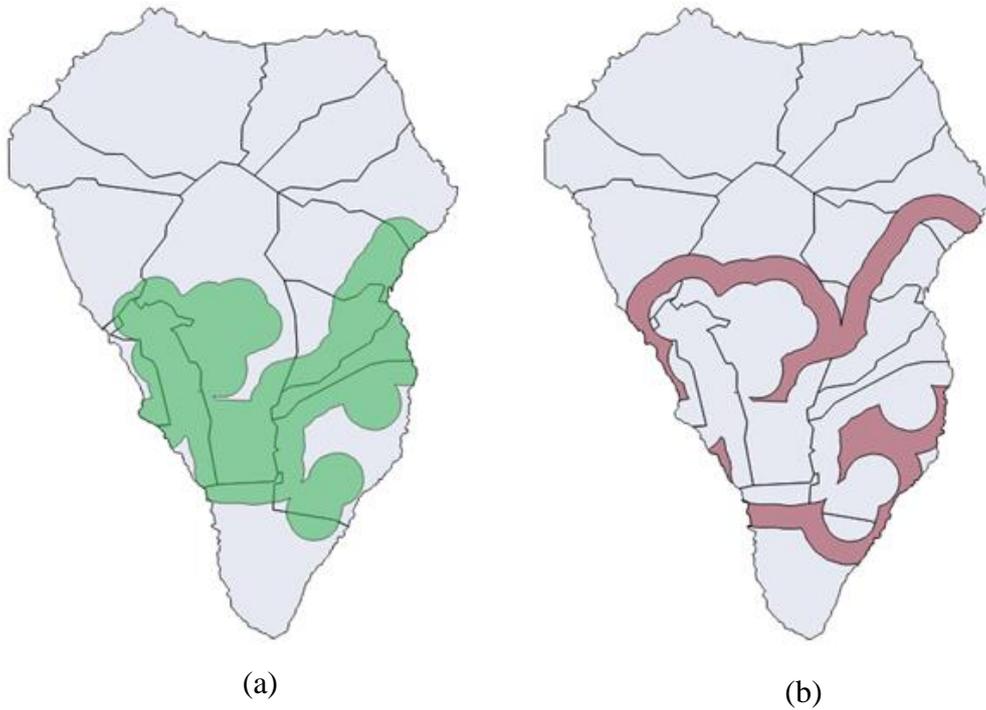


Figura 3-27 Población: (a) Criterio valor 1 recortado; (b) Criterio valor 3 recortado. Elaboración propia

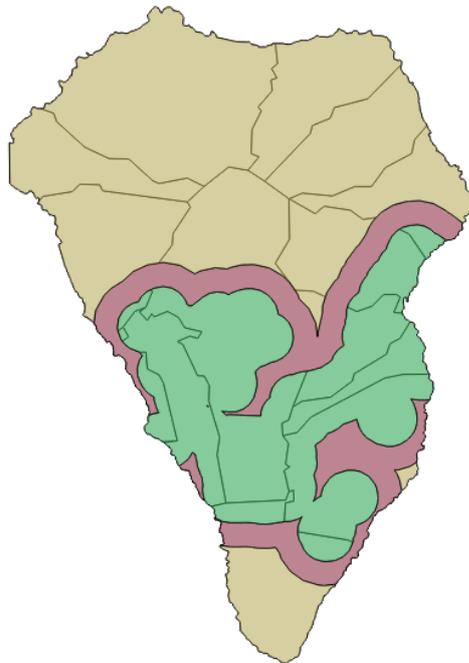


Figura 3-28 Buffers núcleos de población. Elaboración propia

3.8.2 Distancia a embalses

Al igual que el apartado anterior, se procedió a la asignación de los criterios, para asignar los valores correspondientes mediante el uso de buffers. También se tuvieron que realizar las operaciones de *Corte* y *Diferencia* para generar dicha capa.

Los criterios (*Figura 3-29*) que se siguieron fueron los siguientes:

- Si el área se encontraba dentro de 1 kilómetro de un embalse, se le asignó el valor igual a 1.
- Si se situaba a más de 3 kilómetros se le asignó un valor de 3.
- En caso de situarse entre 1 y 3 kilómetros tendría un valor de 5.

La capa con los tres criterios generados se puede observar en la *Figura 3-30*.

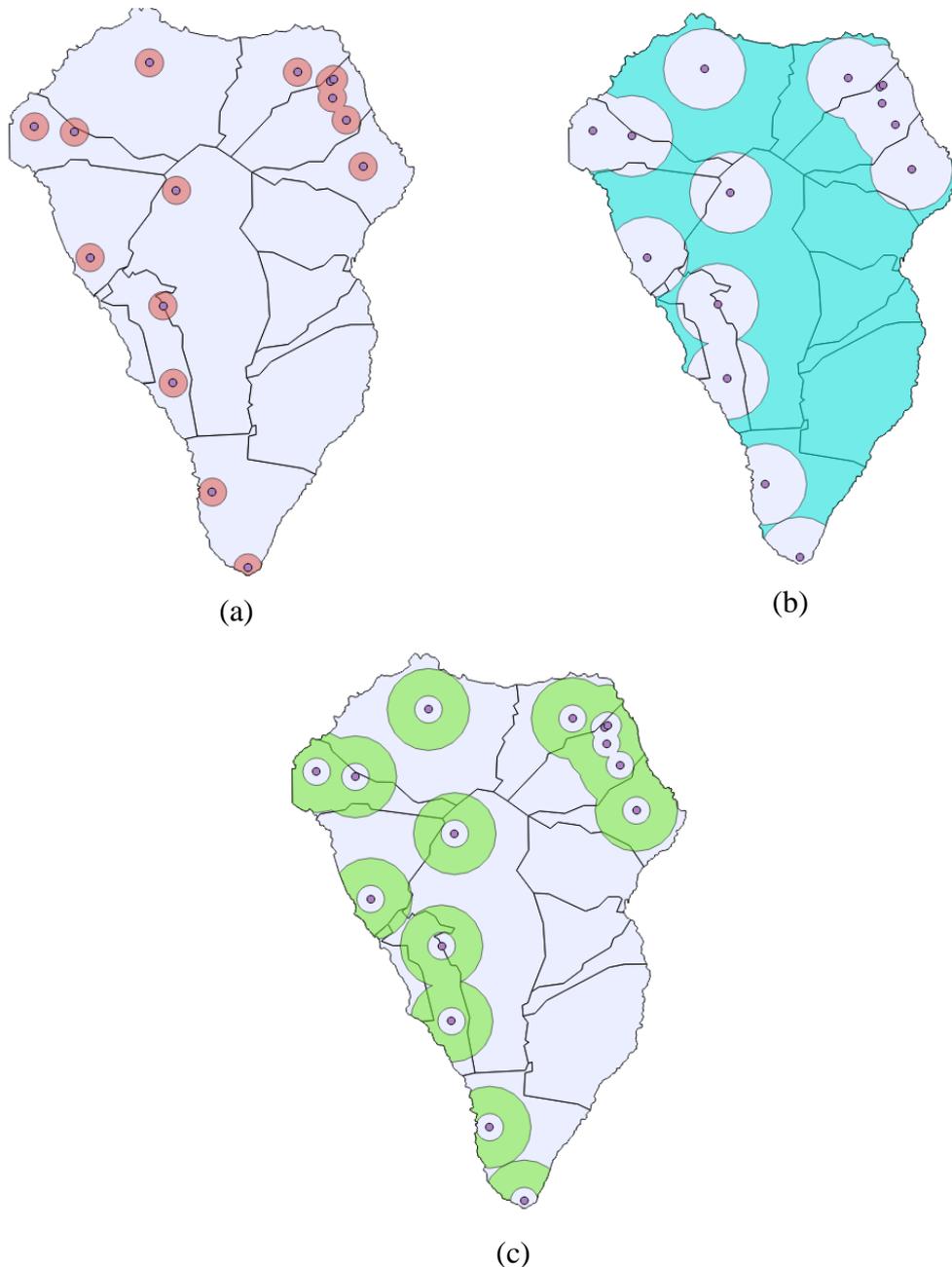


Figura 3-29 Embalses: (a) Criterio valor 1; (b) Criterio valor 3; (c) Criterio valor 5. Elaboración propia

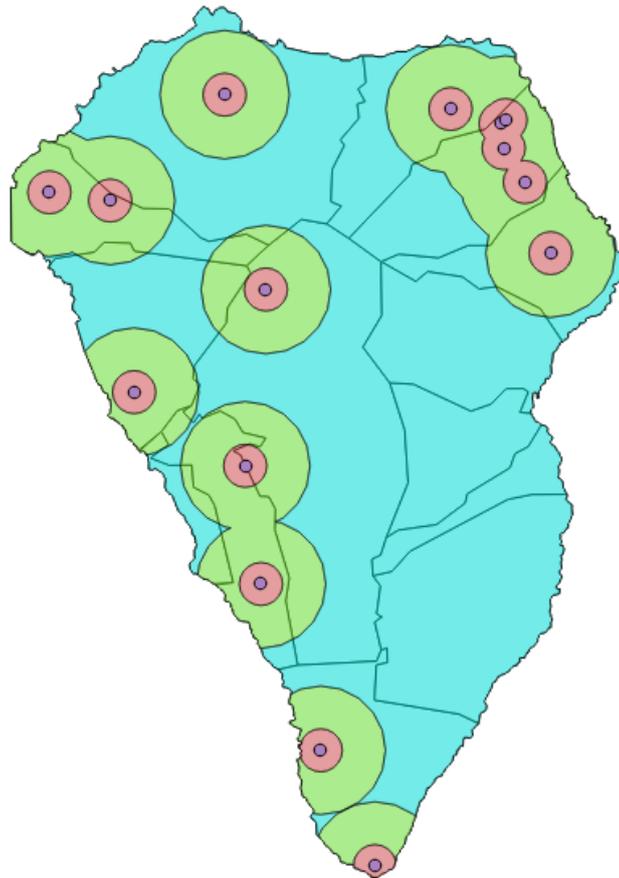


Figura 3-30 Buffers embalses. Elaboración propia

3.8.3 Distancia a carreteras

Se continuó generando de igual manera las capas con los criterios (*Figura 3-31*), en este caso, de la red de carreteras del territorio, realizando tres buffers debido a los tres criterios existentes. Para este caso, los criterios establecidos fueron los siguientes:

- Si la base se encontraba a una distancia menos de 400 metros de una red principal de carreteras, a aquella zona se le asignaría un valor de 1.
- Si la base se encontraba a una distancia de entre 400 y 800 metros de una red principal de carreteras, a aquella zona se le asignaría un valor de 3.
- Si la base se encontraba a una distancia de mayor de 800 metros de una red principal de carreteras, a aquella zona se le asignaría un valor de 3.

La capa con los tres criterios, al igual que en el apartado anterior, puede ser observada en la *Figura 3-32*.

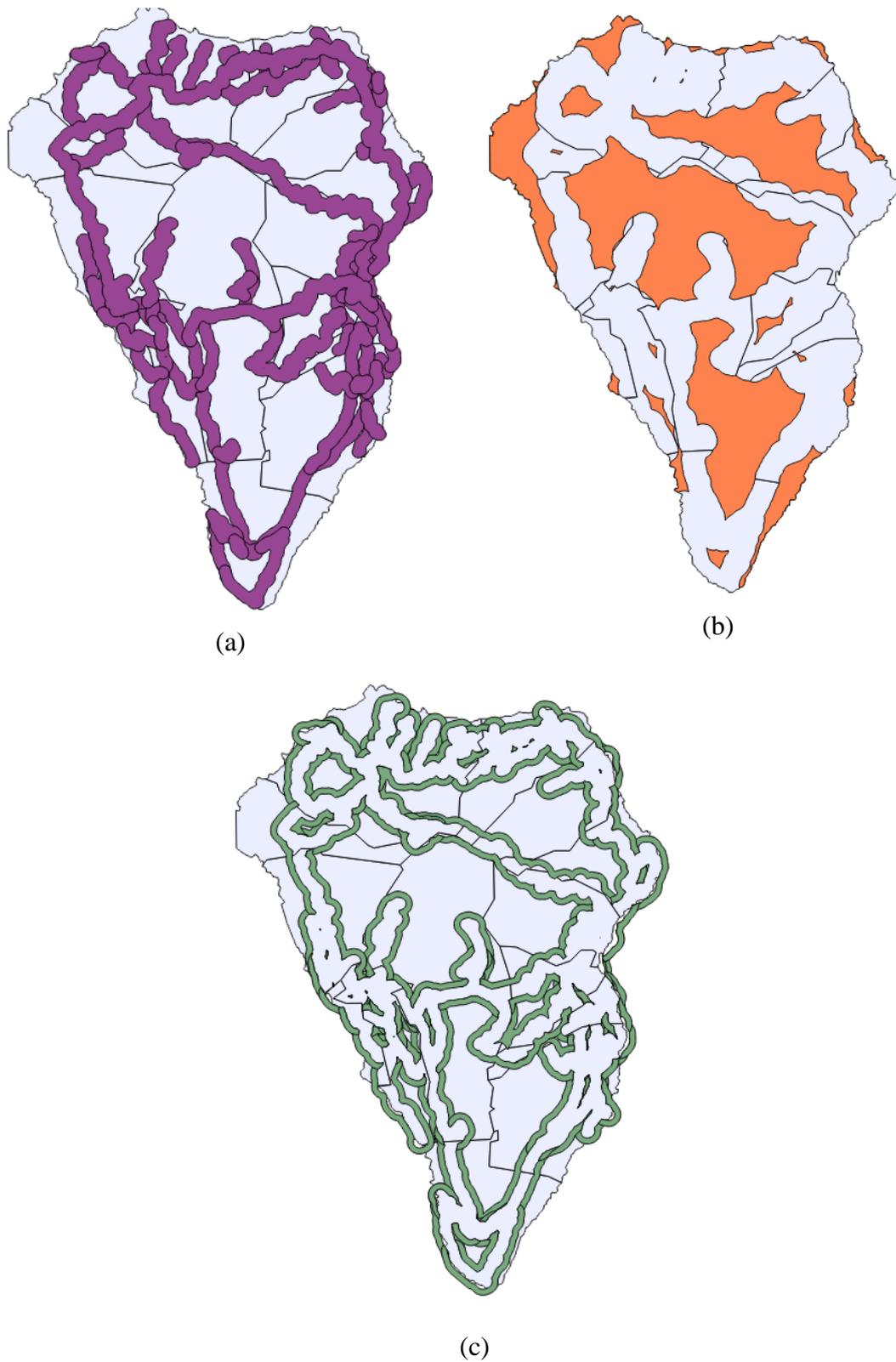


Figura 3-31 Carreteras: (a) Criterio valor 1; (b) Criterio valor 3; (c) Criterio valor 5. Elaboración propia

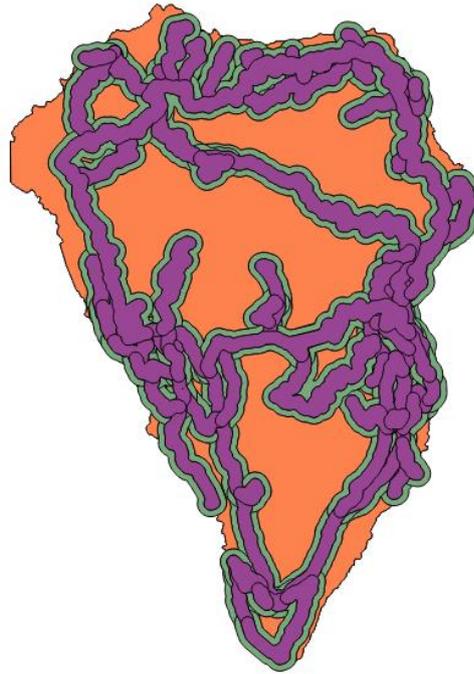


Figura 3-32 Buffers carreteras. Elaboración propia

3.8.4 Cobertura WiMAX

En este caso, como ya fue mencionado en el apartado 3.5.3, debido a la gran importancia que tiene el hecho de obtener un nivel correcto de cobertura para llevar a cabo las operaciones de manera óptima, se dividió el territorio únicamente en dos zonas, aquellas que disponían de un nivel mínimo, a la cual se le otorgó un valor de 5 y aquellas que tenían un nivel insuficiente o que dificultasen la comunicación, se les dio un valor de 1 (Figura 3-33).

De esta manera, se consiguió delimitar claramente las zonas en las que si se cumplía el criterio de nivel de cobertura mínimo, y la zona en la que no se cumplía (Figura 3-34).

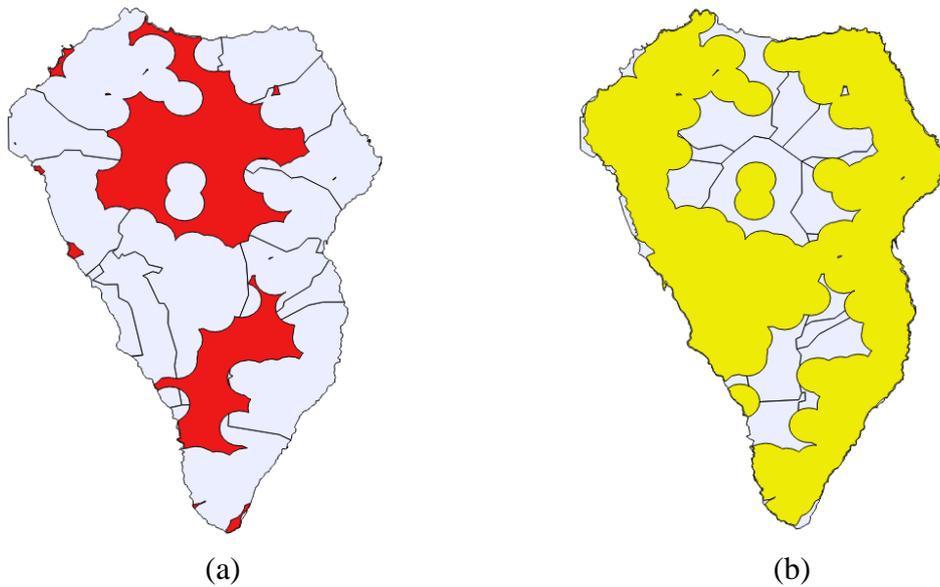


Figura 3-33 Cobertura: (a) Criterio valor 1; (b) Criterio valor 5. Elaboración propia

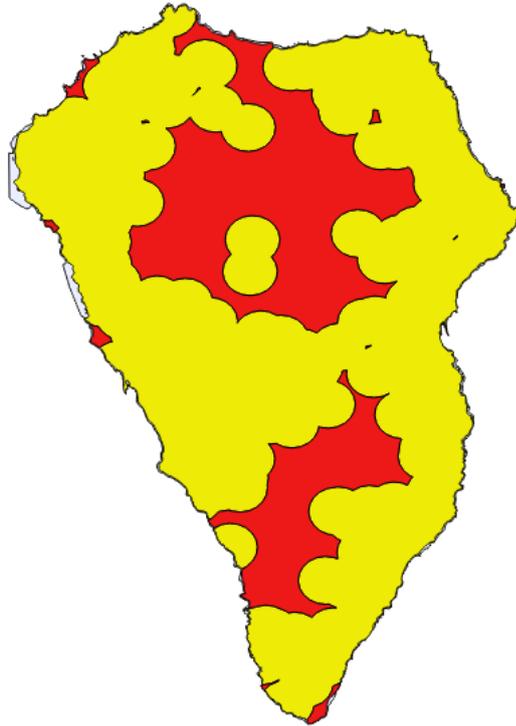


Figura 3-34 Buffers cobertura. Elaboración propia

3.8.5 Elevación

En el caso de la capa de elevación, no se tuvo que implementar la operación buffer, debido a que es un proceso más costoso; dicho proceso consistía en poligonizar la capa, y a continuación, ir dividiéndola en los criterios necesarios, asignándole valores; pero dicho proceso, necesitaba de un gran tiempo de procesamiento debido a la alta cantidad de datos, y además los resultados no eran idóneos.

Por lo tanto, se optó por el uso de la herramienta *r.reclass* que generaba dicha capa en un formato ráster y en un tiempo mucho menor usando un archivo *.txt* (Figura 3-35). En dicho archivo se especificaba como se tenía que clasificar la capa y era usado por la herramienta *r.reclass* (Figura 3-36) para generar la capa necesaria.

 Comando elevación.txt: Bloc de notas

```
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
100 thru 250=5
250 thru 600=3
600 thru 2407=1
0 thru 100=1|
```

Figura 3-35 Criterios elevación. Elaboración propia

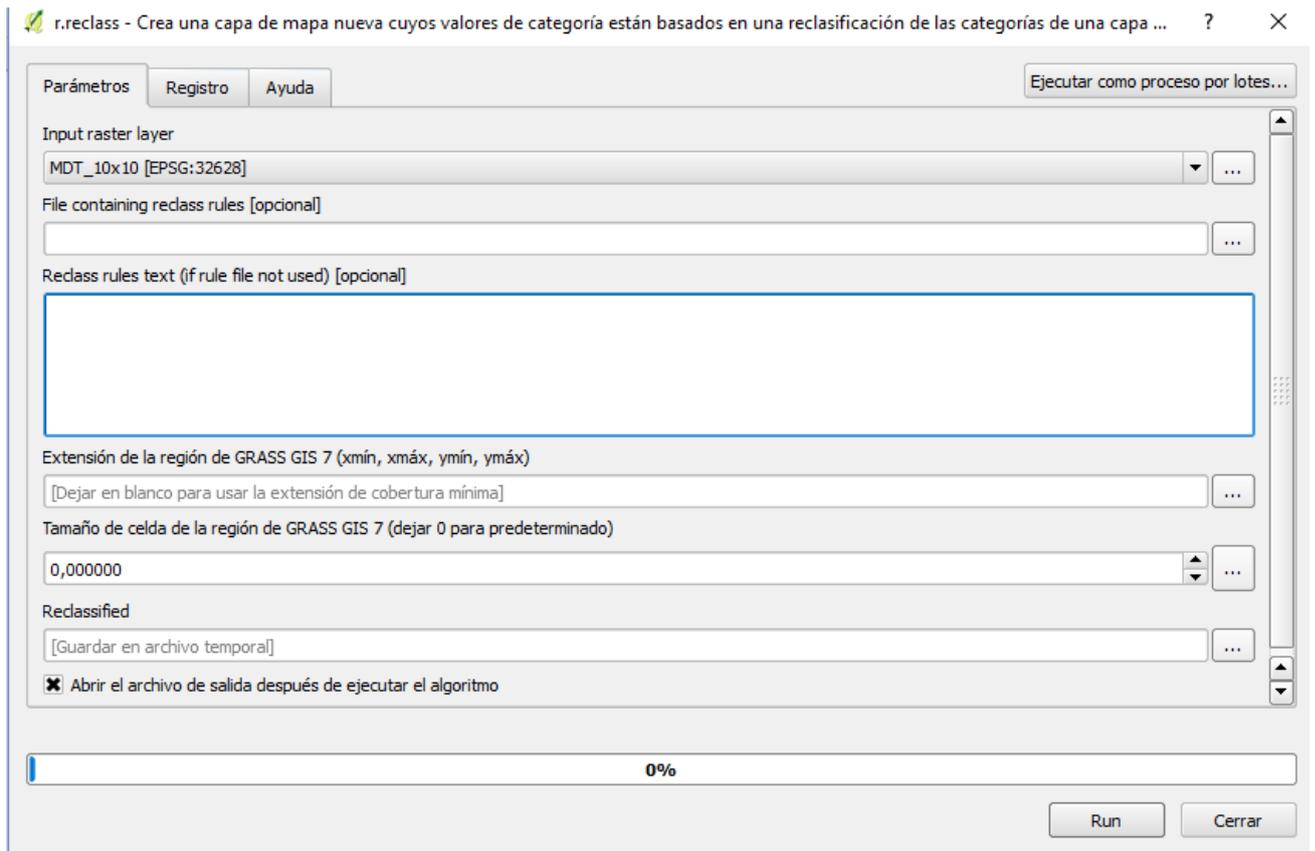


Figura 3-36 Pestaña r.reclass. Elaboración propia

Los criterios usados para la generación de esta capa y que se insertaron en la herramienta fueron los siguientes:

- Las zonas localizadas a una altura de entre 100 y 250 metros, recibirían un valor de 5.
- Aquellas zonas situadas por encima de los 250 metros, pero por debajo de los 600 metros recibirían un valor de 3.
- Por último, las zonas localizadas a más de 600 metros de altura o por debajo de los 100 metros de altura recibirían un valor 1.

Una vez se generaron los criterios en la herramienta, el resultado fue la capa que se puede observar en la *Figura 3-37*.

Esta capa no deberá ser rasterizada debido a que ya está en formato ráster y no tendrá que estar sujeta al proceso explicado en el apartado 3.9.

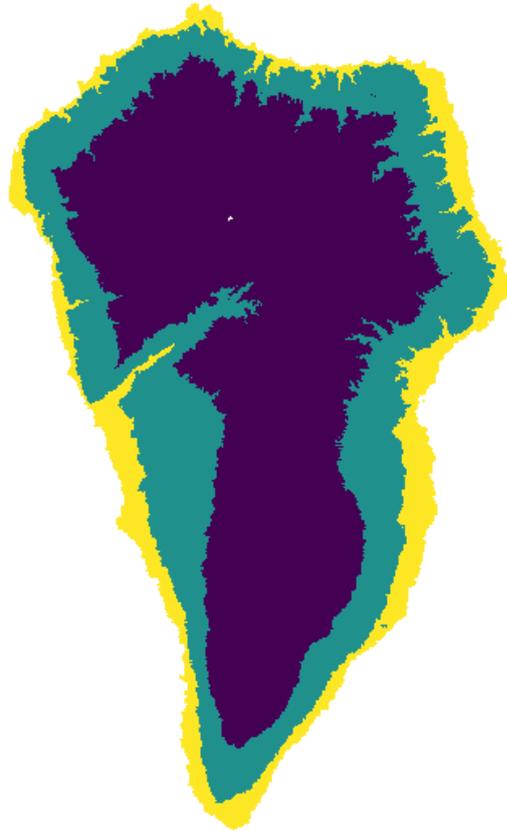


Figura 3-37 Capa clasificada elevación. Elaboración propia

3.8.6 Pendiente

Al igual que en la capa de elevación, debido a la alta cantidad de datos de los que se compone la capa, no era viable convertirla en una capa vectorial, por lo que se optó por la herramienta *r.reclass* para realizar la división.

En este caso los criterios que se eligieron fueron, en un principio, establecidos en función de la pendiente en porcentaje, pero al intentar conseguir esta capa, se generaron ciertos errores, por lo que se optó a reclasificar la capa de pendiente cuyos valores estaba en grados. El archivo que se usó está reflejado en la *Figura 3-38*.

```
comando.txt: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
∅ thru 10=5
10.1 thru 20=3
20.1 thru 64.3987= 1
```

Figura 3-38 Criterios pendiente. Elaboración propia

En la *Figura 3-39*, la clasificación que se dio se puede observar en función del color, siendo aquellas zonas con un color blanco las que tienen un valor de 5 y a medida que se va haciendo más rosa, los valores de aquellas zonas van bajando hasta llegar al valor de 1. Esta capa al ser una capa ráster, no tendrá que ser sometida al proceso de rasterización que se explica en el apartado 3.9.



Figura 3-39 Capa clasificada pendiente. Elaboración propia

3.9 Rasterización de las capas

Una vez obtenidas las capas clasificadas para cada una de las variables, se procedió a rasterizar dichas capas. Este proceso se realizó, para poder unificar en una sola capa, cada uno de los criterios de cada variable, de manera que se consiga de forma rápida y sin grandes tiempos de procesamiento.

La creación de las capas ráster se realizó mediante el empleo de la herramienta *Rasterizar* que se localiza en el menú ráster (*Figura 3-40*).

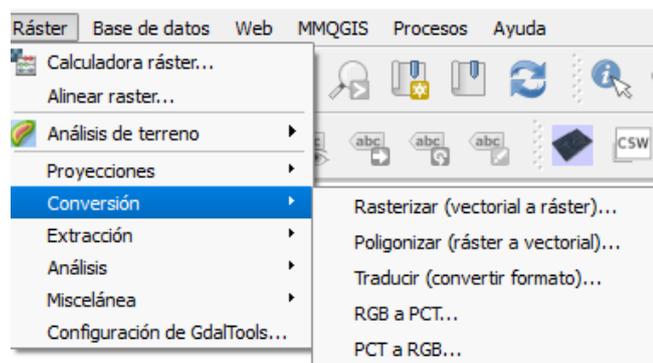


Figura 3-40 Pestaña rasterizar. Elaboración propia

Una vez se selecciona la herramienta, se despliega la pestaña de la herramienta (*Figura 3-41*). Dentro de esta pestaña, se debe seleccionar aquella capa que se quiere rasterizar. Cuando se haya seleccionado, se pide que se seleccione el campo en función del cual se quiere realizar la rasterización; en este caso, se eligió el campo valor que fue asignado anteriormente cuando se realizó la asignación de valores. Realizado este proceso, se debe elegir el tamaño que se desea para el ráster y, por último, establecer un lugar donde guardar la nueva capa.

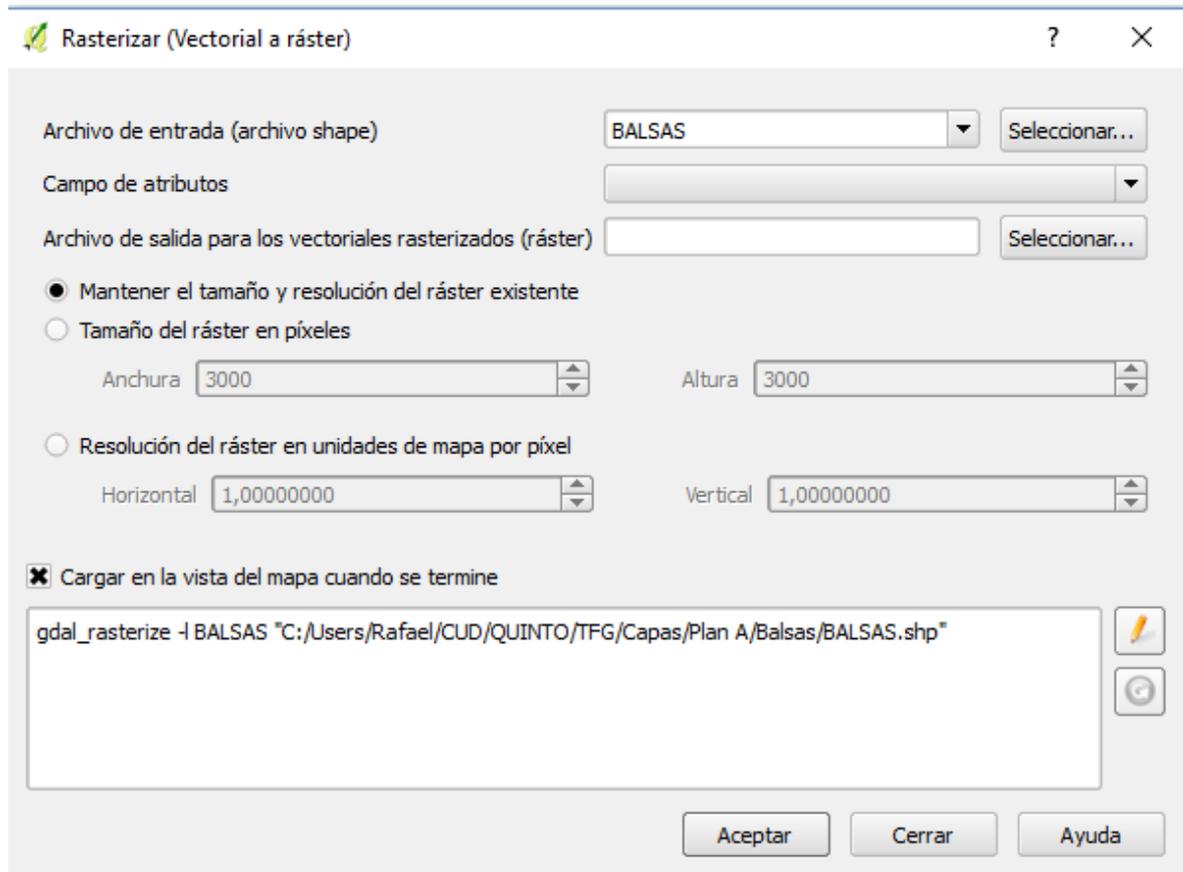


Figura 3-41 Pestaña rasterizar. Elaboración propia

Una vez realizado la rasterización de cada uno de los criterios, se procedió a la suma de estos, para que de manera, se crease una única capa para cada variable, donde se localicen todos los criterios establecidos. Para realizar este proceso, se hizo uso de la herramienta *Calculadora ráster* (*Figura 3-42*), que simplemente suma las capas ráster seleccionadas y las une en una única capa. Esta herramienta será de utilidad para la creación de la capa final, donde se podrán ver de manera optimizada, los emplazamientos para la base militar.

Mencionar que la escala de colores de las capas, se estableció de forma que los colores negros son los valores más bajos y los blancos, valores más altos, dentro de cada uno de los criterios. Esto quiere decir si, por ejemplo, que las zonas en blanco de la *Figura 3-43*, corresponderán al máximo valor, que este caso es el 5.

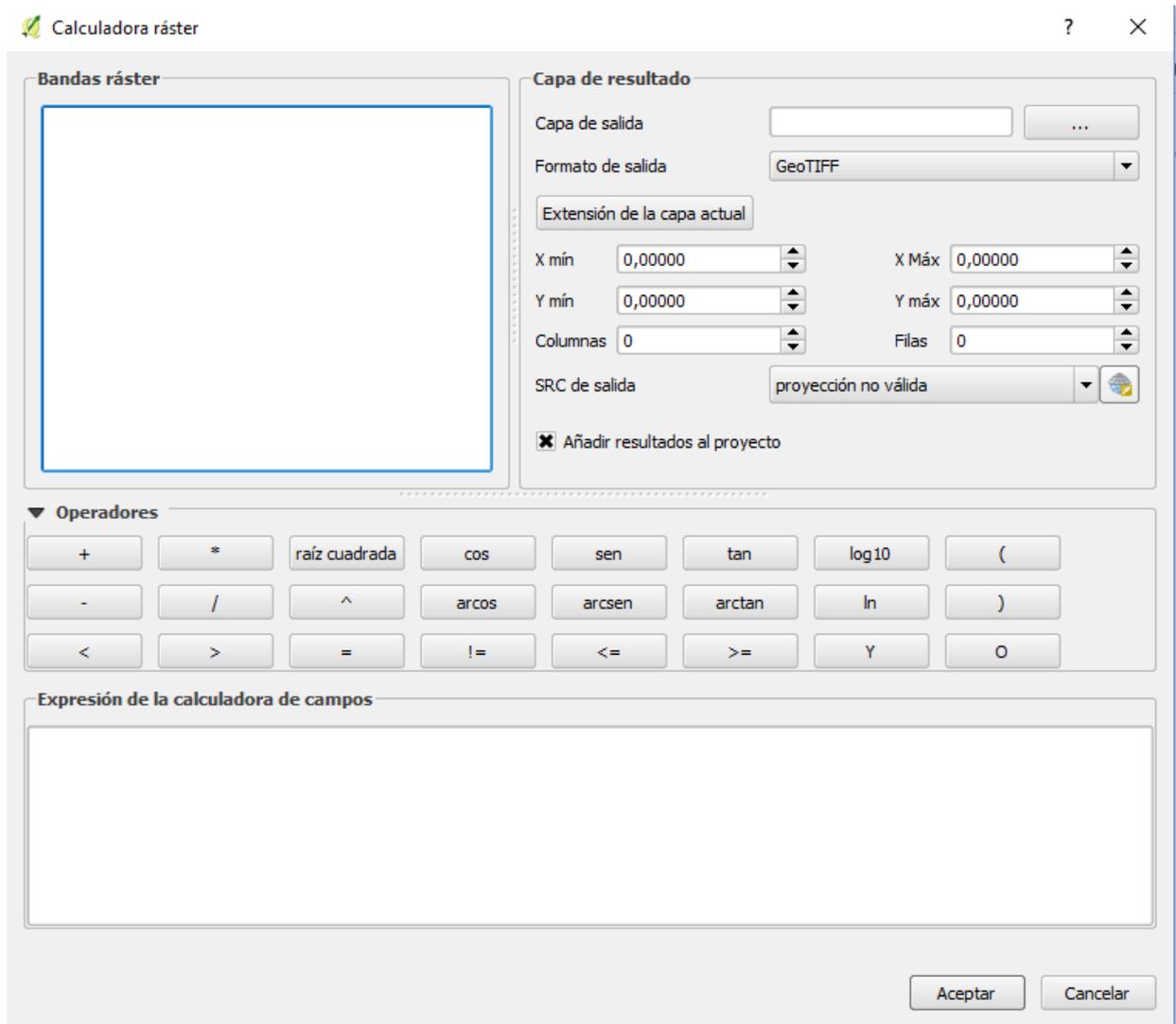
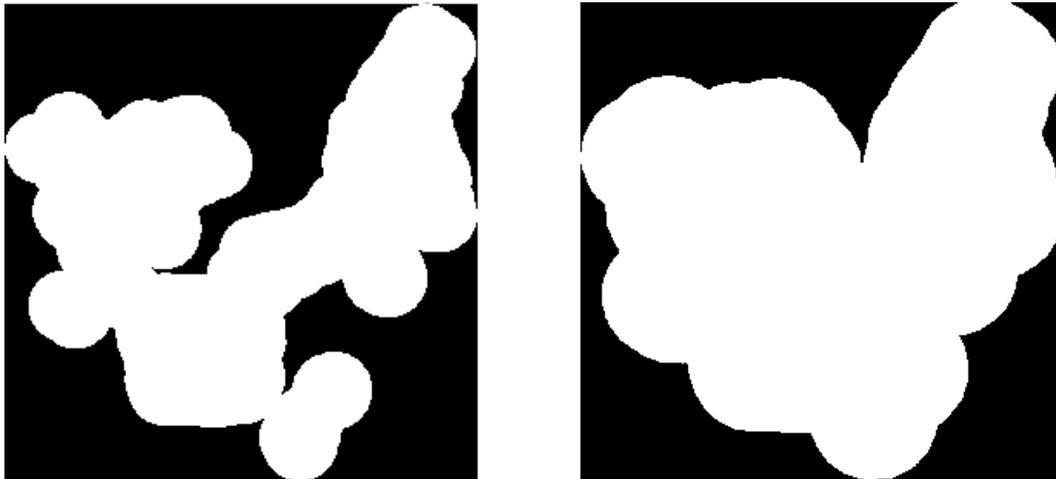


Figura 3-42 Calculadora ráster. Elaboración propia

3.9.1 Núcleos de población

Para la realización de las capas ráster de esta variable, surgiendo diversos problemas que en un principio limitaban el contenido de la misma. Una de las limitaciones que tiene la herramienta *Calculadora ráster* es que cuando se suman varias capas ráster, el resultado que genera únicamente muestra información de la capa más pequeña.

Las capas que fueron obtenidas en un principio, se muestran en la *Figura 3-43* y como se comentó en el párrafo anterior, al no ser todas las capas de igual tamaño, ya que se ajustan a la información que aportan, se generó una capa que no abarcaba todo el territorio estudiado y que posteriormente generaría problemas a la hora de realizar la capa final. En la *Figura 3-44* se puede observar la capa generada, cuya escala de colores en esta varía, siendo en este caso, cuanto más oscura, mayor valor.



(a)

(b)



(c)

**Figura 3-43 Población ráster: (a) Criterio valor 1; (b) Criterio valor 3; (c) Criterio valor 5.
Elaboración propia**



Figura 3-44 Capa ráster errónea distancia a población. Elaboración propia

Para conseguir resolver este problema, lo que se realizó fue, a las capas que no contemplasen todo el territorio, se le añadió antes de rasterizarlas, una zona que consistía en la zona del territorio que no abarcaba, y darle un valor de 0, por lo tanto, a la hora de rasterizar, esa zona no influiría en el resultado, pero sí que ampliaría la zona de la capa resultante, y por lo tanto, eliminando los problemas de la capa final (*Figura 3-45*).



Figura 3-45 Capa ráster núcleos de población. Elaboración propia

3.9.2 Cobertura WiMAX

Este caso, las capas que se rasterizaron, ocupaban en gran parte, todo el territorio bajo estudio, por lo que no hubo que aplicarle ningún procesado. En este caso, al haber solo dos criterios, se rasterizaron las dos capas de las que se disponían (*Figura 3-46*).

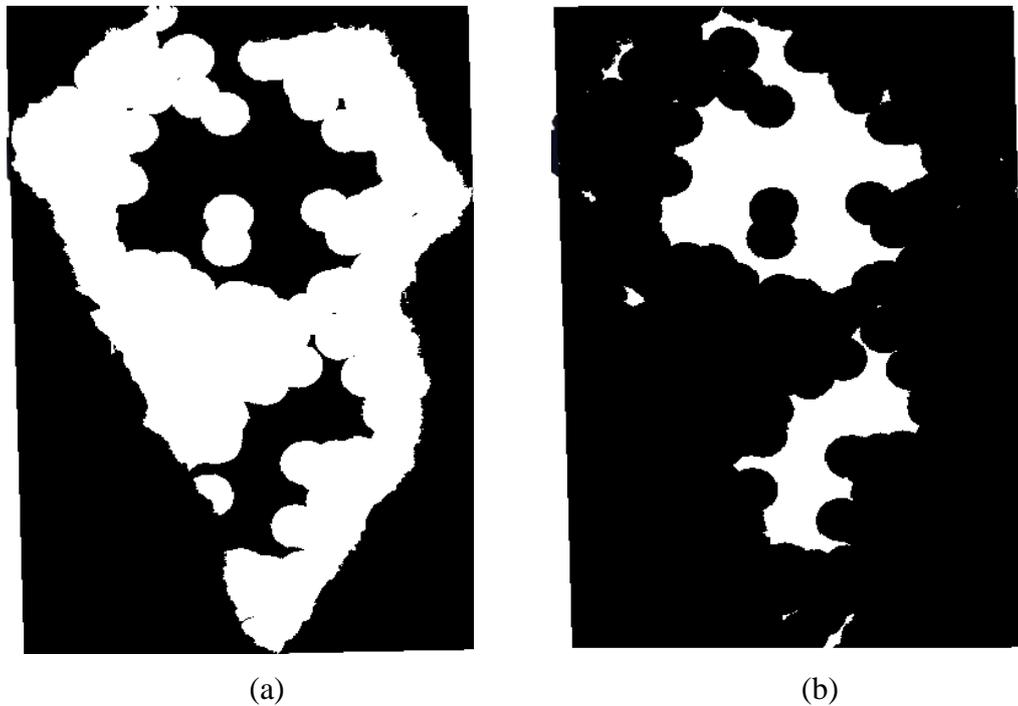


Figura 3-46 Cobertura ráster: (a) Criterio valor 5; (b) Criterio valor 1. Elaboración propia

Obtenidas las dos capas ráster de los criterios, se procedió a su suma usando la *Calculadora ráster*. En este caso, se generó la capa completa directamente (*Figura 3-47*).



Figura 3-47 Capa ráster cobertura. Elaboración propia

3.9.3 Embalses

Durante la generación de las capas ráster para la capa de *Embalses* se realizó un proceso similar al apartado 3.9.1, ya que el ráster generado no cubría el territorio en su totalidad. Una vez realizadas las operaciones necesarios, los ráster obtenidos fueron los que aparecen en la *Figura 3-48*.

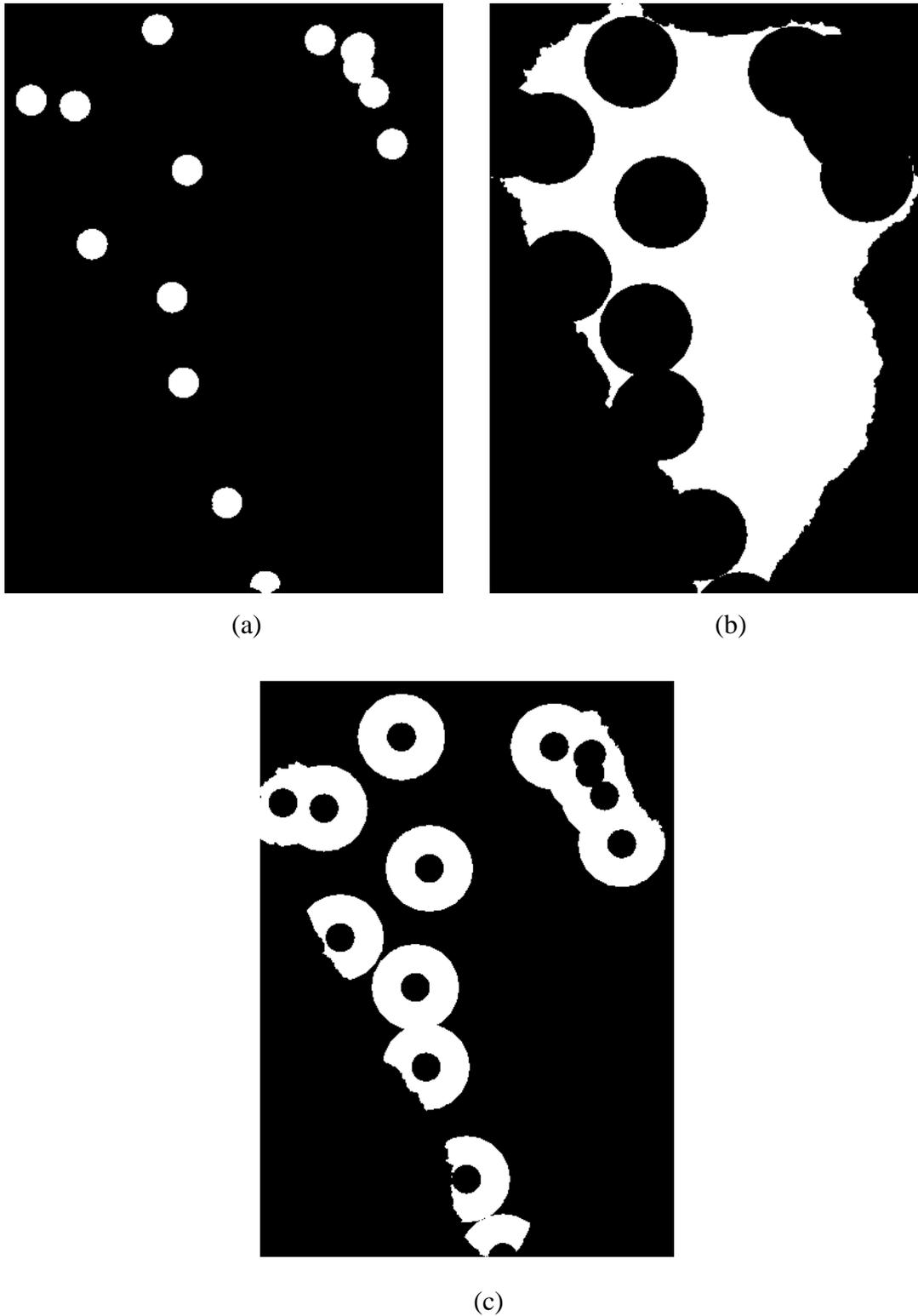


Figura 3-48 Embalses ráster: (a) Criterio valor 1; (b) Criterio valor 3; (c) Criterio valor 5. Elaboración propia

Una vez obtenidas las capas parciales, se usó la *Calculadora ráster* para sumar las anteriores y generar la capa ráster final de la distancia a embalses (*Figura 3-49*).

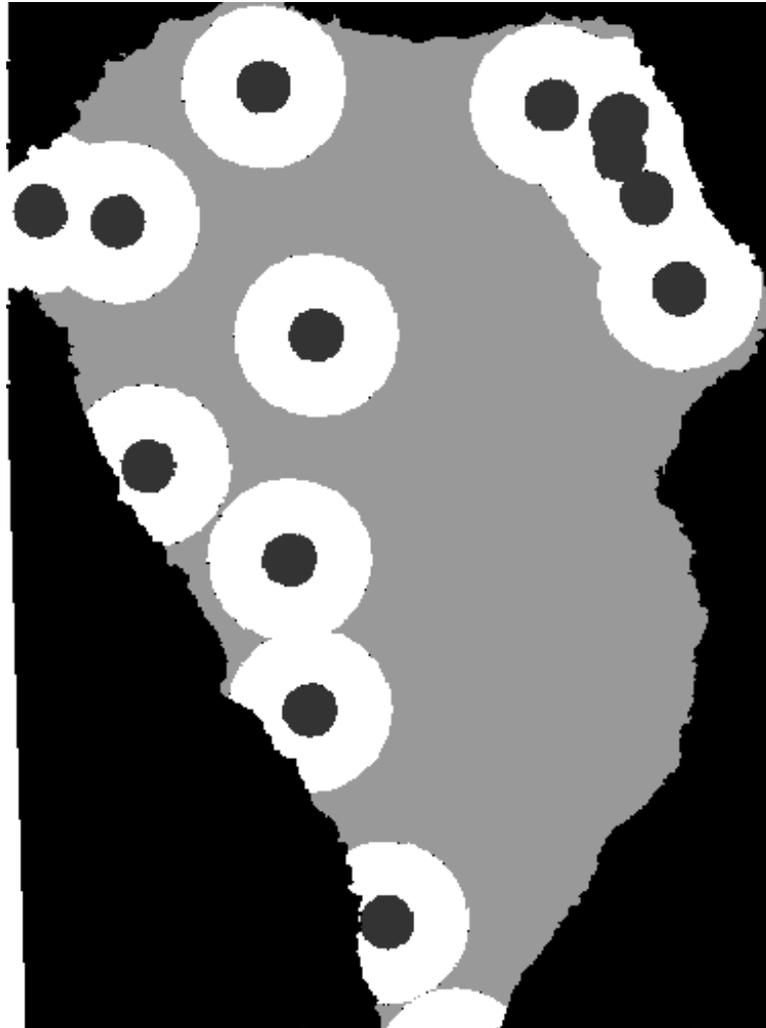
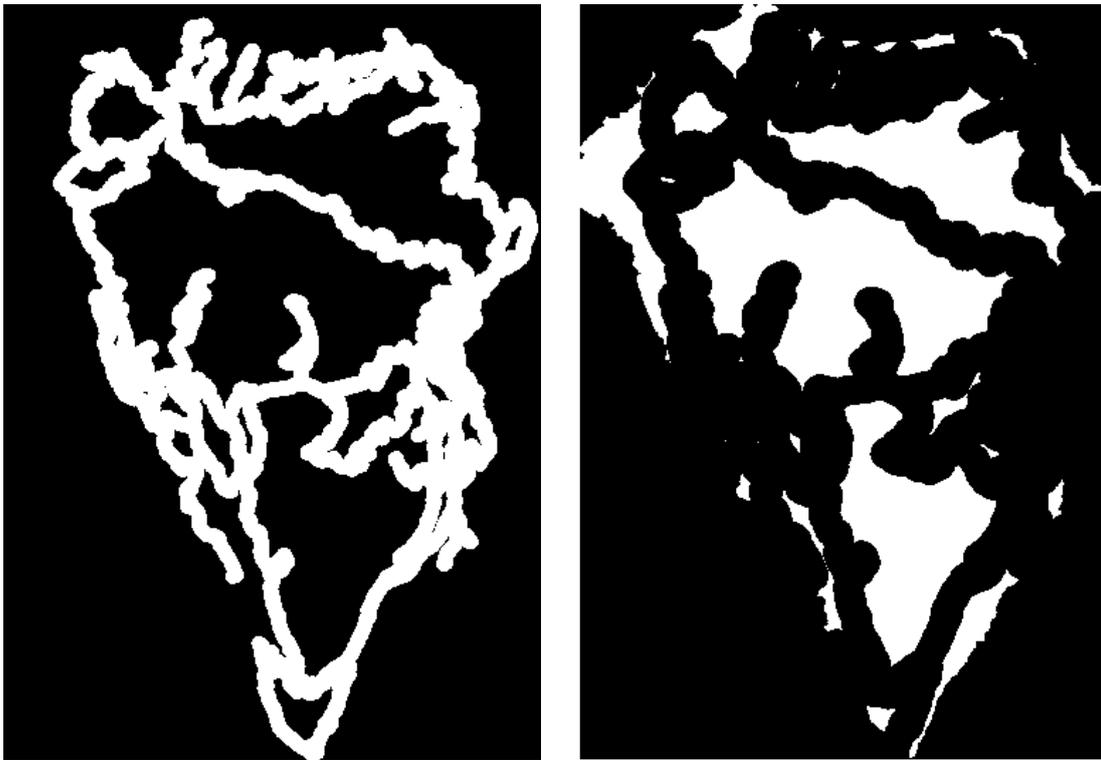


Figura 3-49 Capa ráster distancia a embalses. Elaboración propia

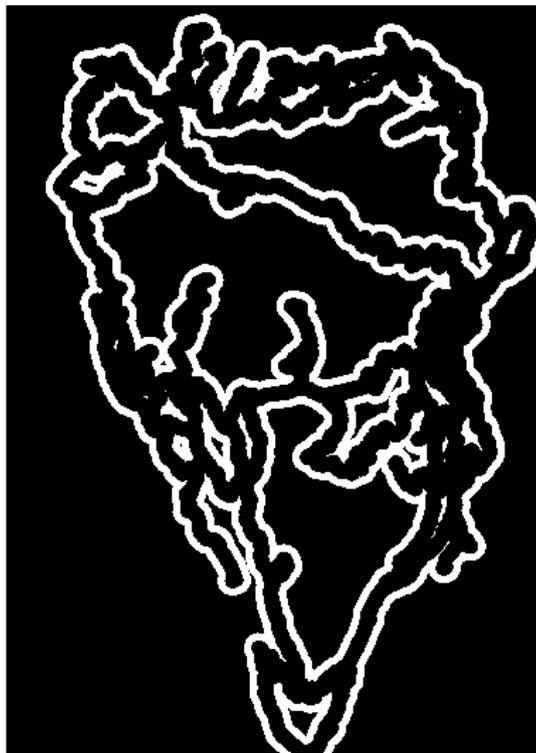
3.9.4 Carreteras

Al igual que para el resto de los criterios, obtenidos los buffers de la capa de carreteras, se procedió a su rasterización. Durante dicho proceso, para la capa de red de carreteras, ocurrió un ligero problema, el cual fue que al aplicar la herramienta *Rasterizar* no se creaban las capas esperadas, generándose una capa de color negro que en la que no aparecía ningún tipo de datos. Para solucionar el problema se tuvo que adaptar el tamaño del ráster, que es una de las opciones que permite la herramienta, reduciendo la capa. Una vez se realizó la reducción, ya se obtuvieron las capas necesarias que se muestran en la *Figura 3-50*.



(a)

(b)



(c)

Figura 3-50 Carreteras ráster: (a) Criterio valor 1; (b) Criterio valor 3; (c) Criterio valor 5. Elaboración propia

Obtenidas estas capas, se volvió a hacer uso de la *Calculadora ráster* para unir las y generar la capa ráster final (*Figura 3-51*).



Figura 3-51 Capa ráster carreteras. Elaboración propia

3.10 Implementación MCDA

Una vez se generaron todas las capas ráster que se iban a utilizar en el trabajo, se derivó a la última parte del estudio, en la que se consiguió obtener una capa final que fuese una mezcla de todas las anteriores. Para este proceso, se aplicó el método de análisis multicriterio mencionado y explicado en el apartado 3.7. A continuación, se detallará los procesos que se llevaron a cabo para realizar este parte del trabajo.

3.10.1 Matriz de comparación pareada

En la *Tabla 3-3* se puede observar cómo era la matriz que se usó para esto ejemplo. Lo que se hizo fue ir rellenando para cada comparación los valores en función de las variables comparadas. En un principio, se añadieron también las variables de *Uso de suelos* y la capa de *Zonas de especial protección* y se compararon con el resto de variables, pero al final fueron eliminadas debido a que estas capas tienen un carácter restrictivo, es decir, que si alguna de las alternativas recaía dentro de alguna de estas zonas, directamente no podría ser seleccionada y esta variable tampoco era introducida dentro de la *Calculadora ráster* a la hora de generar la capa final y por lo tanto fueron eliminadas.

Para determinar que variables eran más importantes que otras, se utilizó en parte, las comparaciones que vienen especificadas en [3], donde realizaba un estudio para seleccionar una base militar para el

ejército de Sri Lanka. Habiendo visto estas comparaciones, se adaptaron a este trabajo, resultando en la matriz que se observa en la *Tabla 3-6*.

	Núcleos de población	Elevación	Cobertura	Distancia a embalses	Distancia a carreteras	Pendiente
Núcleos de población	1,0	1,0	1/3	1,0	7,0	1/5
Elevación	1,0	1,0	1/3	5,0	5,0	1/3
Cobertura	3,0	3,0	1,0	3,0	4,0	1/3
Distancia a embalses	1,0	1/5	1/3	1,0	5,0	1/3
Distancia a Carreteras	1/7	1/5	1/4	1/5	1,0	1/5
Pendiente	5,0	3,0	3,0	3,0	5,0	1,0
TOTAL	11,143	8,400	5,250	13,200	27,000	2,400

Tabla 3-6 Matriz de comparación pareada. Elaboración propia

3.10.2 Matriz Normalizada

Una vez generada la matriz de comparación pareada, lo que se realizó a continuación fue construir la matriz normalizada, siendo esta, la misma matriz que la anterior, pero en este caso, los valores de dentro de la tabla serán cada uno de los valores anteriores, divididos entre el total de cada columna. Por ejemplo, cada valor de la columna de *Núcleos de población*, se dividió entre el total de esa columna, en este caso 11.143. La tabla resultante se muestra en la *Tabla 3-7*.

	Núcleos de población	Elevación	Cobertura	Distancia a embalses	Distancia a carreteras	Pendiente
Núcleos de población	0,09	0,12	0,06	0,08	0,26	0,08
Elevación	0,09	0,12	0,06	0,38	0,19	0,14
Cobertura	0,27	0,36	0,19	0,23	0,15	0,14
Distancia a embalses	0,09	0,02	0,06	0,08	0,19	0,14
Distancia a Carreteras	0,01	0,02	0,05	0,02	0,04	0,08
Pendiente	0,45	0,36	0,57	0,23	0,19	0,42

Tabla 3-7 Matriz normalizada. Elaboración propia

Esta matriz normalizada permitió, una vez realizada, obtener los pesos que recibieron cada una de las variables y que se introdujeron posteriormente en el programa para generar la capa final. Para conseguir los pesos, se realizó una operación promedio de cada una de las filas de la matriz normalizada, dando como resultado la *Tabla 3-8*.

	Promedio
Núcleos de Población	0,11511
Elevación	0,16252
Cobertura	0,22186
Distancia a embalses	0,09615
Distancia a Carreteras	0,03663
Pendiente	0,36774

Tabla 3-8 Pesos de las variables. Elaboración propia

3.10.3 Cálculo del ratio de consistencia

Debido a que el método utilizado es proceso subjetivo y no objetivo, se pueden generar fallos debido al factor humano. En el apartado 3.7.3 se comentó en qué consistía el ratio de consistencia; a continuación, se explicará cómo se calculó y comprobar si las comparaciones generadas eran válidas.

Para hallar el RC, primero hubo que hallar el IC y luego dividirlo entre el IA. Para el primer valor, únicamente había que multiplicar la matriz de comparación pareada con los pesos obtenidos gracias a la matriz normalizada; obtenida esta multiplicación, se sumaron los valores de la matriz resultante. Una vez se halló este valor, se usaron las fórmulas que vienen descritas en el apartado 3.7.3, y resultó en un valor de 0.1235. Debido a que este valor estaba por encima del valor máximo aceptado, hubo que reestructurar la matriz inicial y cambiar alguno de los valores, dando lugar a la *Tabla 3-9* y la *Tabla 3-10*.

	Núcleos de población	Elevación	Cobertura	Distancia a embalses	Distancia a carreteras	Pendiente
Núcleos de población	1,00	1,00	1/3	1,00	5,00	1/4
Elevación	1,00	1,00	1/2	5,00	5,00	1/3
Cobertura	3,00	2,00	1,00	3,00	3,00	1/3
Distancia a embalses	1,00	1/5	1/3	1,00	5,00	1/3
Distancia a Carreteras	1/5	1/5	1/3	1/5	1,00	1/5
Pendiente	4,00	3,00	3,00	3,00	5,00	1,00
TOTAL	10,20	7,400	5,500	13,200	24,000	2,450

Tabla 3-9 Matriz de comparación pareada modificada. Elaboración propia

Se generó también la nueva matriz normalizada, de donde se obtuvieron los nuevos pesos.

	Núcleos de población	Elevación	Cobertura	Distancia a embalses	Distancia a carreteras	Pendiente
Núcleos de población	0,10	0,14	0,06	0,08	0,21	0,10
Elevación	0,10	0,14	0,09	0,38	0,21	0,14
Cobertura	0,29	0,27	0,18	0,23	0,13	0,14
Distancia a embalses	0,10	0,03	0,06	0,08	0,21	0,14
Distancia a Carreteras	0,02	0,03	0,06	0,02	0,04	0,08
Pendiente	0,39	0,41	0,55	0,23	0,21	0,41

Tabla 3-10 Matriz normalizada modificada. Elaboración propia

Con esta modificación se consiguió rebajar el valor del RC, haciendo uso este caso de los valores de los pesos, que se muestran en la *Tabla 3-11*; el nuevo valor para el RC se rebajó a 0.9987, siendo este un valor aceptable.

	Promedio
Núcleos de población	0,11332
Elevación	0,17454
Cobertura	0,20576
Distancia a embalses	0,10097
Distancia a Carreteras	0,04095
Pendiente	0,36446

Tabla 3-11 Pesos de las variables corregidos. Elaboración propia

3.10.4 Aplicación en QGIS

Una vez calculados los pesos para cada variable, el único paso restante era el de aplicarlos al programa. Para realizar este proceso, se volvió a hacer uso de *Calculadora ráster*; se insertaron todas las capas ráster generadas, multiplicadas cada una por su variable, se guardó la capa y se construyó la capa.

Para finalizar el procesado de la capa, hubo que restarles aquellas zonas que no fuesen compatibles con las capas de uso de suelos del *Corine* (*Figura 3-52*) y las zonas de especial protección.

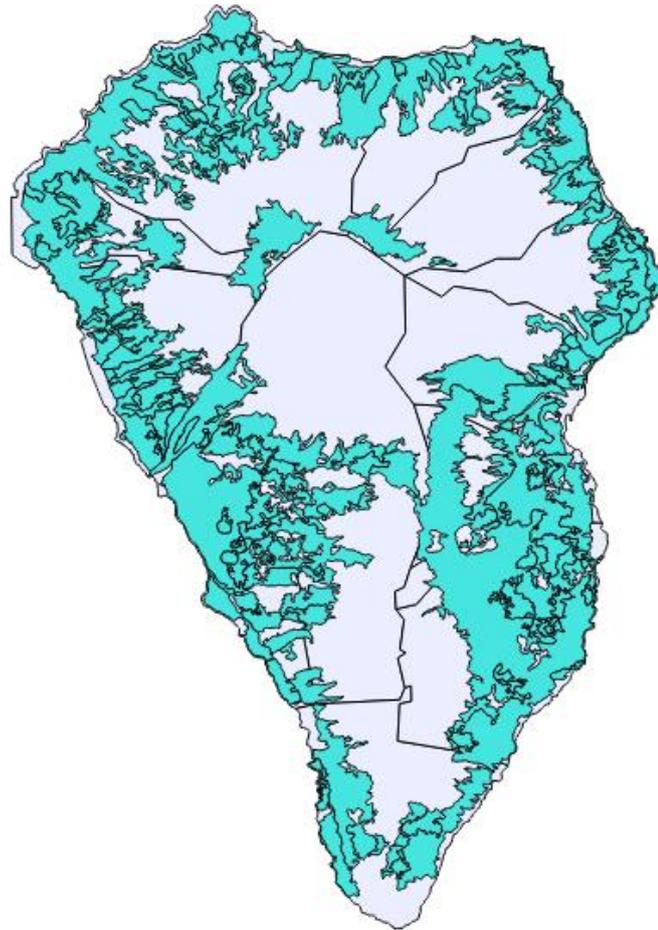


Figura 3-52 Zonas compatibles para el emplazamiento. Elaboración propia

3.11 Estudio de Alternativas

Realizado el primer caso estudio del trabajo, para una base militar con un nivel bajo de amenaza, con sus correspondientes criterios, se propuso la realización de varios casos estudio, con las mismas variables que se nombraron a lo largo del trabajo, pero variando los criterios para cada una de ellas y los pesos de cada variable.

3.11.1 Base militar avanzada en territorio enemigo

Para este caso estudio, los criterios usados fueron parecidos al ejemplo principal pero con alguna variación de ciertas capas. La principal característica para este caso es que la base debería de estar localizada fuera de zonas controladas por fuerzas enemigas y mantener un alto factor sorpresa, por lo tanto, los criterios de cada variable se variaron como se refleja a continuación. Como en el apartado 3.5, se realizó una tabla resumen (*Tabla 3-12*) con los criterios que serán detallados en las siguientes líneas.

Variables	Criterio		
	5	3	1
Distancia a núcleos de población	>4 kilómetros	Entre 1,5 y 4 kilómetros	< 1,5 kilómetros
Elevación	Entre 100 y 250 metros	Entre 250 y 600 metros	>600 metros < 100 metros
Cobertura	Nivel correcto	-	Nivel insuficiente
Distancia a embalses	<1 kilómetro	Entre 1 y 3 kilómetros	>3 kilómetros
Distancia a carreteras	>1000 metros	Entre 450 y 1000 metros	< 450 metros
Pendiente	< 10 grados	Entre 10 y 20 grados	> 20 grados
Territorio enemigo	>4 kilómetros	-	<4 kilómetros

Tabla 3-12 Criterios base avanzada. Elaboración propia

3.11.1.1 Distancia a núcleos de población

En este caso, la distancia a la que tenía que estar el emplazamiento era de gran importancia también para mantener el factor sorpresa. A mayor distancia, mayor valor tendría esa zona al igual que el caso anterior pero variando las distancias.

- Si el emplazamiento se sitúa a una distancia de 1.5 kilómetros, obtendría un valor de 1.
- Si se encuentra a una distancia de entre 1.5 y 4 kilómetros, obtendría un valor de 3.
- Si se encuentra a una distancia de más de 4 kilómetros, obtendría un valor de 5.

3.11.1.2 Cobertura

Para el caso de la cobertura, el criterio fue el mismo, teniendo que estar la base en un lugar con una cobertura de un nivel aceptable. Pero en este caso, la cobertura no tendría un valor tan determinante, ya que la variación de la localización para cumplir con este criterio, podría hacer que se perdiese parte del factor sorpresa.

3.11.1.3 Distancia a carreteras

Cuando se estudia a que distancia tiene que estar la base de la red de carreteras principales, se tuvo que tener en cuenta que a mayor distancia, mayor posibilidad de sorprender al enemigo, por lo que en este caso lo criterios que se siguieron fueron los siguientes:

- En caso de situarse a una distancia de 450 metros de una carretera, obtendría un valor de 1.
- Si se situase a una distancia de entre 450 metros y 1000 metros, tendría un valor de 3.
- Por último, a una distancia mayor de 1000 metros, tendría un valor de 5.

3.11.1.4 Distancia a embalses

El agua al ser un elemento indispensable para la vida en la base, y al estar en una zona enemiga, el conseguir dicho recurso puede ser de gran dificultad y podría eliminar parte del factor sorpresa, por lo tanto, los criterios que se describieron son los siguientes:

- A una distancia de más de 3 kilómetros, el valor obtenido sería de un 1.
- A una distancia de entre 1 y 3 kilómetros, se otorga un valor de 3.
- A una distancia de menos de 1 kilómetro, el valor obtenido es de 5.

3.11.1.5 Pendiente y elevación

En caso de la capa de pendiente y elevación, los criterios se mantuvieron iguales ya que es necesario que la base esté a una cierta elevación para ganar el factor altura, pero sin mucha pendiente para no entorpecer las operaciones y transporte de tropas.

3.11.1.6 Distancia de territorios enemigos

Para esta variable, se tuvieron que generar unas áreas simulando emplazamientos de territorios enemigos, y en este caso, los criterios que fueron formulados eran restrictivos, es decir, tenían que situarse una distancia de al menos 4 kilómetros o no valdría ese emplazamiento.

3.11.2 Base militar en zona de operaciones sin amenaza

En este caso, este tipo de base militar tiene muchas menos restricciones que una base militar con un cierto nivel de amenaza o una base militar avanzada en territorio enemigo. Son por ejemplo, bases intermedias para el despliegue de la fuerza. Normalmente, son bases logísticas con el objetivo de recibir las unidades y fuerza que va llegando a zonas de operaciones antes de ser desplegada a puestos avanzados de combate. En la *Tabla 3-13* aparece el resumen de los criterios para este caso estudio.

Variables	Criterio		
	5	3	1
Distancia a núcleos de población	<3 kilómetros	Entre 1,5 y 3 kilómetros	>3 kilómetros
Elevación	<150 metros	Entre 150 y 300 metros	>300 metros
Cobertura	Nivel correcto	-	Nivel insuficiente
Distancia a embalses	Entre 1 y 3 kilómetros	>3 kilómetros	<1 kilómetro
Distancia a carreteras	<800 metros	Entre 400 y 800 metros	>800 metros
Pendiente	< 10 grados	Entre 10 y 20 grados	> 20 grados

Tabla 3-13 Criterios base sin amenaza. Elaboración propia

3.11.2.1 Distancia a núcleos de población

Para esta variable, los criterios variaron casi de manera contraria, intentando buscar la cercanía del emplazamiento a núcleos poblados. Los criterios que se describieron fueron los siguientes:

- Si la base se encuentra a más de 3 kilómetros de un núcleo poblado, obtendrá un valor de 1.
- Si se sitúa a una distancia de entre 1.5 y 3 kilómetros tendrá un valor de 3.
- Si se encuentra a una distancia menor de 1.5 kilómetros, tendrá un valor de 5.

3.11.2.2 Cobertura

Para esta variable, se mantuvieron los mismos criterios que las capas anteriores debido a su importancia para las actividades cotidianas y para las actividades labores del personal.

3.11.2.3 Distancia a carreteras

Al no tener que buscar el factor sorpresa, no era necesario que se situase a una distancia muy grande de las principales redes de carreteras, Además, lo que se intentó, fue facilitar el acceso a la base de la fuerza que se va a recibir para su posterior despliegue en una zona más avanzada. Los criterios a continuación fueron los descritos para esta capa:

- Una distancia mayor de 800 metros obtendría un valor de 1.
- Se situase a una distancia de entre 400 y 800 metros tendría un valor de 3.
- A una distancia menor de 400 metros se le otorgaría un valor de 5.

3.11.2.4 Distancia a embalses

Esta variable no tenía tanta importancia como en los otros casos estudiados, pero aun así, disponía cierta necesidad el tener de manera accesible recursos para conseguir agua. Los criterios que se especificaron para esta base militar son similares a los descritos en el apartado 3.5.4.

3.11.2.5 Pendiente y elevación

En este caso, se restringió de manera similar la pendiente que tiene que tener la base militar, pero la elevación sí que variaba, ya que no era tan necesario contar con la ventaja de estar en lugares con una mayor elevación. Por lo tanto, los criterios para la elevación que se relataron son los siguientes:

- Para una altura mayor de 300 metros se le asigna un valor de 1.
- Para una altura entre 150 y 300 metros se le asigna un valor de 3.
- Para una altura menos de 150 metros se le asigna un valor de 5.

3.11.3 Base aérea militar

En el proceso de construcción de una base aérea se tuvieron que tener en cuenta ciertas restricciones más severas de las variables de las que se disponen. Las principales restricciones a la que se enfrentó este caso, fue la elevación y pendiente en la que se debía situar esta base, en especial, la segunda de estas variables, ya que era un factor clave para construir la pista de aterrizaje para las aeronaves. Además, a diferencia de un aeropuerto, una base aérea no requiere que esté muy alejada de núcleos poblados, ya que no dispone de tanto tráfico como un aeropuerto y las horas de trabajo coinciden con horario de oficina, por lo que no genera una excesiva contaminación acústica. Se pueden observar en la *Tabla 3-14* el resumen de los criterios que serán descritos a continuación.

Variables	Criterio		
	5	3	1
Distancia a núcleos de población	>3 kilómetros	Entre 1,5 y 3 kilómetros	<1.5 kilómetros
Elevación	<100 metros	Entre 100 y 300 metros	>300 metros
Cobertura	Nivel correcto	-	Nivel insuficiente
Distancia a embalses	Entre 1 y 3 kilómetros	>3 kilómetros	<1 kilómetro
Distancia a carreteras	Entre 400 y 800 metros	>800 metros	<400 metros
Pendiente	< 4 grados	Entre 4 y 7 grados	> 7 grados

Tabla 3-14 Criterios base aérea. Elaboración propia

3.11.3.1 Distancia a núcleos de población

Para esta variable, en principio, no cobraba tanta importancia como la pendiente o elevación del terreno, pero era preferible que esta se situase a cierta distancia de los núcleos poblados, por temas de seguridad y de protección.

Los criterios que se establecieron eran los siguientes:

- Si la base se encuentra a más de 3 kilómetros de un núcleo poblado, obtendrá un valor de 5.
- Si se sitúa a una distancia de entre 1.5 y 3 kilómetros tendrá un valor de 3.
- Si se encuentra a una distancia menor de 1.5 kilómetros, tendrá un valor de 1.

3.11.3.2 Cobertura

Al igual que el resto de casos que se han estudiado, la cobertura era un factor importante. En este caso, cobraba gran importancia para coordinación de operaciones de despegue y aterrizaje, al igual que la información relevante a dichas operaciones. No tenía tanta relevancia como la variable de la pendiente ya que se podían realizar ciertas instalaciones para conseguir un nivel adecuado en caso de no disponer cobertura.

3.11.3.3 Distancia embalses

Como es habitual, era necesario una fuente de obtención de agua para el abastecimiento de los componentes de la base, aunque había que tener en cuenta, que estos puntos de obtención de agua se tenían que situar a cierta distancia para no limitar el desarrollo de las operaciones.

Los criterios seguidos fueron los siguientes.

- A una distancia de menos de 1 kilómetro, el valor obtenido es de 1.
- A una distancia de más de 3 kilómetros, el valor obtenido sería de 3.
- A una distancia de entre 1 y 3 kilómetros, se otorga un valor de 5.

3.11.3.4 Distancia a carreteras

Los criterios establecidos para esta capa eran los mismos descritos en el apartado 3.5.5 ya que no se necesitaba que estuviese situada a una distancia muy grande de las redes de carreteras, pero había que establecer un mínimo para estas no entorpeciese el transcurso de las maniobras realizadas en la base.

3.11.3.5 Pendiente

Esta variable era la que más importancia cobraba, ya que si no se conseguía su valor óptimo, podía ser determinante para rechazar la selección del emplazamiento en el territorio estudiado. Era de suma importancia debido a que las pistas de aterrizaje no permiten que la pendiente sea de gran valor.

Los criterios establecidos fueron los siguientes:

- Si la pendiente tiene una inclinación de 4 grados o menos, obtendrá un valor de 5.
- Si la pendiente tiene una inclinación entre 4 y 7 grados, obtendrá un valor de 3.
- Si la pendiente tiene una inclinación mayor a 7 grados, obtendrá un valor de 1.

3.11.3.6 Elevación

Para el caso de la elevación, no era tan determinante como la pendiente, pero si tenía bastante importancia. A medida que aumenta la elevación, es necesario que la pista de aterrizaje sea de mayor longitud ya que las condiciones atmosféricas variaran.

Los criterios seguidos son los siguientes:

- Para una altura mayor de 300 metros se le asigna un valor de 1
- Para una altura entre 100 y 300 metros se le asigna un valor de 3
- Para una altura menos de 100 metros se le asigna un valor de 5.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Resultado de los casos estudio

4.1.1 Base militar con nivel medio/bajo de amenaza

Después de haber realizado todos los cálculos pertinentes explicados en el apartado 1, se llegó a la capa donde vienen reflejadas aquellas localizaciones donde sería más idóneo realizar la base. En esta primera figura, se aprecia la capa final, sin eliminar aquellas zonas donde no era viable la construcción de la base militar. La capa está clasificada con una escala del 1 al 10, siendo el 10 el lugar más idóneo para situar el emplazamiento (*Figura 4-1*).

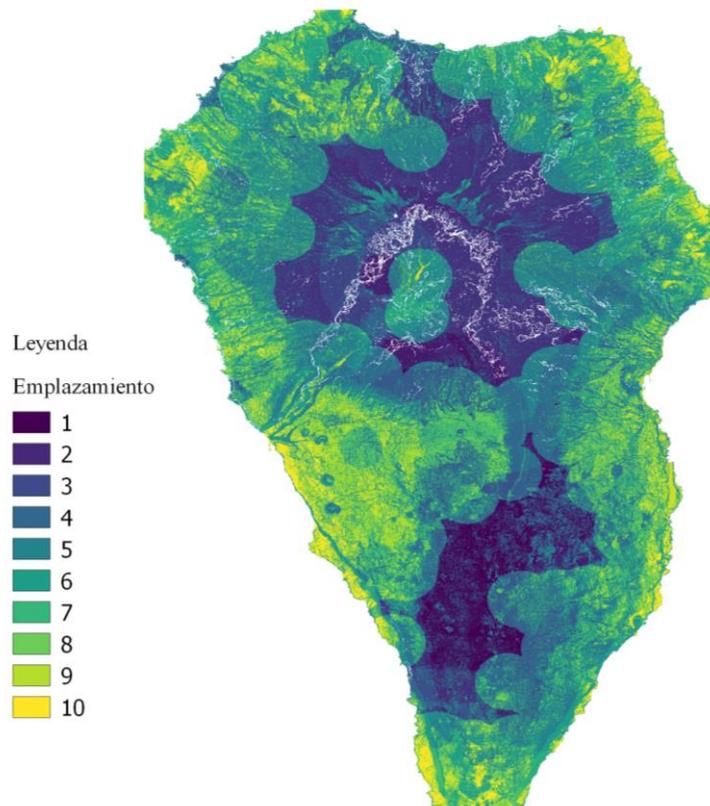


Figura 4-1 Alternativas base con amenaza media/baja. Elaboración propia

Una vez se consiguió esta capa, se procedió a la eliminación de las zonas no válidas debido al uso de los suelos y zonas protegidas, derivando en la figura que se puede apreciar a continuación (*Figura 4-2*).

Se puede apreciar perfectamente como aquellas alternativas propuestas en la *Figura 4-1* se ven reducidas bastante en la *Figura 4-2*, pero aún siguen quedando posibles alternativas para situar la base. Uno de los problemas afrontados fue que la *Calculadora ráster* cortaba parte del contorno de la capa, como se puede apreciar en las esquinas noroeste, noreste y sur. Se trató de resolver este problema de varias maneras, pero no se consiguió conseguir completamente, quedando la capa con una pequeña parte del territorio sin analizar.

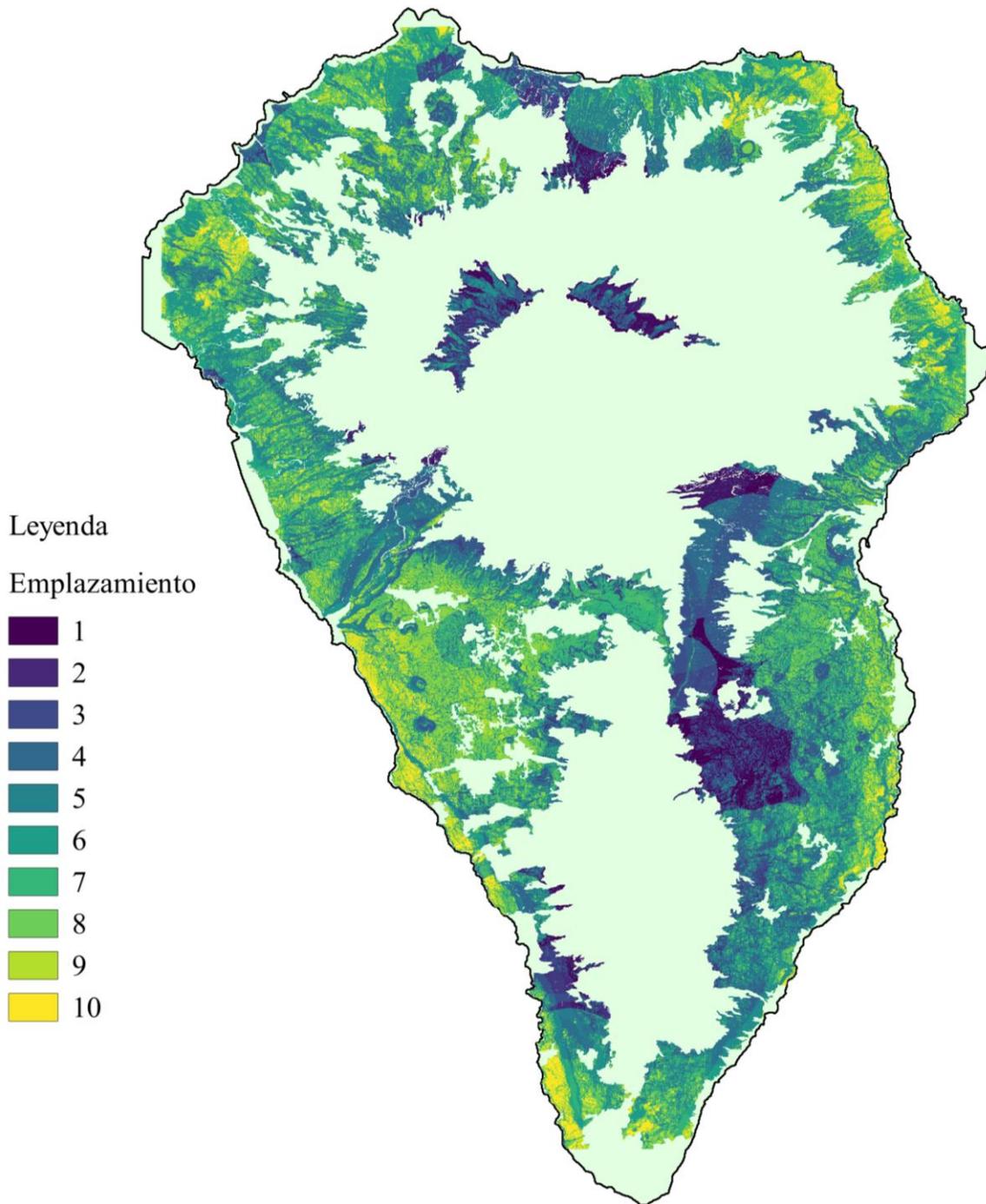


Figura 4-2 Alternativas finales. Elaboración propia

4.1.2 Base militar avanzada en territorio enemigo

Al igual que el estudio anterior, se generó la capa con las alternativas posibles en función de los criterios óptimos para este tipo de base militar. En este caso, debido a la gran restricción que sufre, que es que este alejada de aquellos territorios en posesión de la fuerza enemiga, no se realizó el filtrado de aquellas zonas con un tipo de suelo no óptimo ya que era de mayor importancia que el sitio fuese el más idóneo sin necesidad de que el suelo fuese, ya que se realizarían los procesos necesarios para adaptar el suelo donde se sitúe el emplazamiento.

La *Tabla 4-1* y la *Tabla 4-2* son las matrices de comparación pareada y normalizada, respectivamente, del caso estudio para una base militar avanzada en territorio enemigo, que dio como resultado los pesos reflejados en la *Tabla 4-3*. Usando dichas tablas se obtuvo que el valor del RC era de 0.0987.

	Núcleos población	Elevación	Cober.	Distancia embalses	Distancia carreteras	Pendiente	Terr. enemigo
Núcleos población	1,0	1/3	5,0	1,0	3,0	1/3	1/7
Elevación	3,0	1,0	5,0	3,0	5,0	1,0	1/5
Cober.	1/5	1/5	1,0	1/3	3,0	1/3	1/6
Distancia embalses	1,0	1/3	3,0	1,0	4,0	1/3	1/3
Distancia Carretera	0,3	1/5	1/3	1/4	1,0	1/3	1/5
Pendiente	3,0	1,0	3,0	3,0	3,0	1,0	1,0
Territorio enemigo	7,0	5,0	6,0	3,0	5,0	1,0	1,0
TOTAL	15,533	8,067	23,333	11,583	24,000	4,333	3,043

Tabla 4-1 Matriz comparación pareada base militar avanzada. Elaboración propia

	Núcleos población	Elevación	Cober.	Distancia embalses	Distancia carreteras	Pendiente	Terr. enemigo
Núcleos población	0,06	0,04	0,21	0,09	0,13	0,08	0,05
Elevación	0,19	0,12	0,21	0,26	0,21	0,23	0,07
Cober.	0,03	0,02	0,04	0,03	0,13	0,08	0,05
Distancia embalses	0,06	0,04	0,13	0,09	0,17	0,08	0,11
Distancia Carretera	0,02	0,02	0,01	0,02	0,04	0,08	0,07
Pendiente	0,19	0,12	0,13	0,26	0,13	0,23	0,33
Territorio enemigo	0,44	0,62	0,26	0,26	0,21	0,23	0,33

Tabla 4-2 Matriz normalizada base militar avanzada. Elaboración propia

	Promedio
Núcleos de población	0,09342
Elevación	0,18451
Cobertura	0,05496
Distancia a embalses	0,09607
Distancia a Carreteras	0,03800
Pendiente	0,19792
Territorio enemigo	0,33512

Tabla 4-3 Pesos base militar avanzada. Elaboración propia

La *Figura 4-3* fue la capa que se generó después de usar los pesos obtenidos para esta capa, donde se puede ver claramente la delimitación que tiene aquellas zonas bajo el control de las fuerzas enemigas y de las cuales habría que situarse a una cierta distancia.

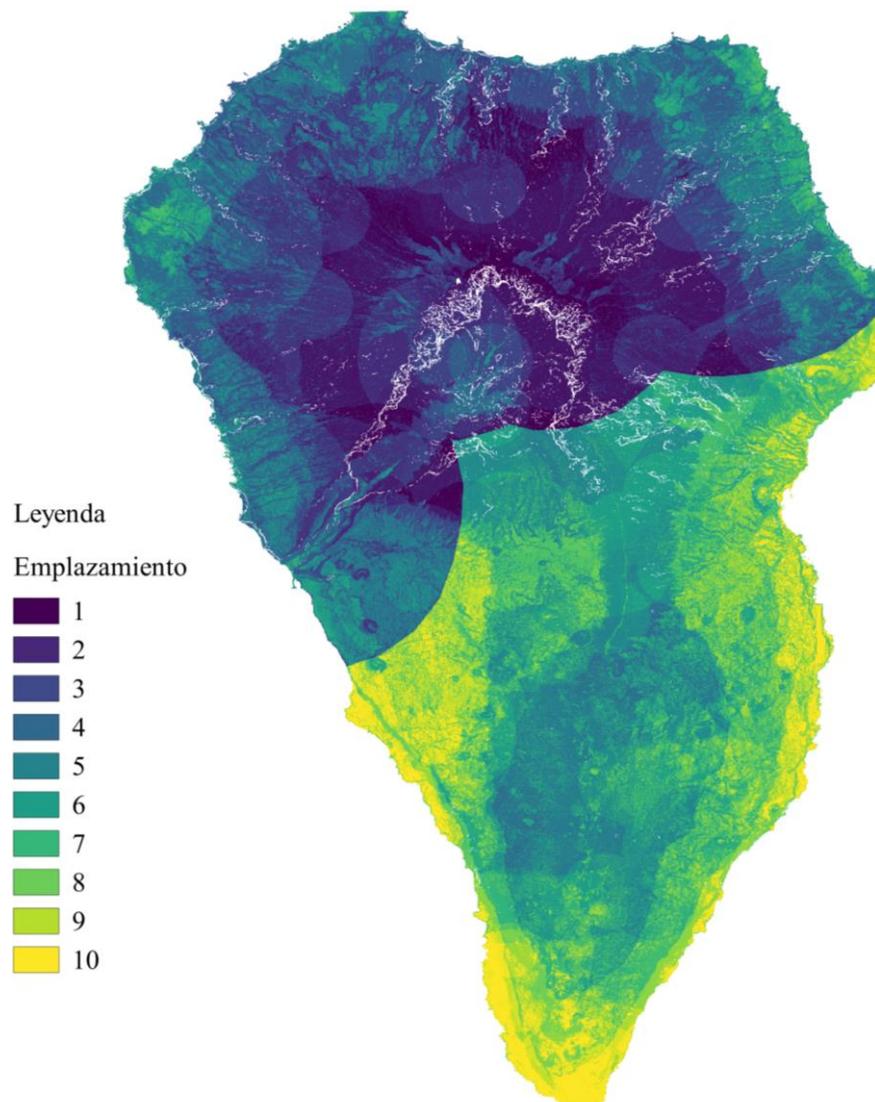


Figura 4-3 Alternativas base militar avanzada. Elaboración propia

4.1.3 Base militar sin amenaza en zonas de operaciones

Este es otro de los casos de estudio que se realizaron. Esta vez, se trataba una base militar en zona de operaciones, pero con un nivel de amenaza muy bajo que servía para la recepción de la fuerza antes de transportarse a posiciones más avanzadas.

Las matrices de comparación pareada (Tabla 4-4) y normalizada (Tabla 4-5) se pueden ver a continuación. El valor de RC en este caso fue de 0.0875.

	Núcleos de población	Elevación	Cobertura	Distancia a embalses	Distancia a carreteras	Pendiente
Núcleos de población	1,00	1/3	1/5	1,00	1/5	1/4
Elevación	3,00	1,00	1/2	5,00	1,00	1,00
Cobertura	5,00	2,00	1,00	5,00	1,00	1/2
Distancia a embalses	1,00	1/5	1/5	1,00	1/5	1/3
Distancia a Carreteras	5,00	1,00	1,00	5,00	1,00	1,00
Pendiente	4,00	1,00	2,00	3,00	1,00	1,00
TOTAL	19,000	5,533	4,900	20,000	4,400	4,083

Tabla 4-4 Matriz de comparación pareada base sin amenaza. Elaboración propia

	Núcleos de población	Elevación	Cobertura	Distancia a embalses	Distancia a carreteras	Pendiente
Núcleos de población	0,05	0,06	0,04	0,05	0,05	0,06
Elevación	0,16	0,18	0,10	0,25	0,23	0,24
Cobertura	0,26	0,36	0,20	0,25	0,23	0,12
Distancia a embalses	0,05	0,04	0,04	0,05	0,05	0,08
Distancia a Carreteras	0,26	0,18	0,20	0,25	0,23	0,24
Pendiente	0,21	0,18	0,41	0,15	0,23	0,24

Tabla 4-5 Matriz Normalizada base sin amenaza. Elaboración propia

En función de esta última matriz, se generaron los pesos (Tabla 4-6) para realizar la capa final de este caso (Figura 4-4).

	Promedio
Núcleos de población	0,05173
Elevación	0,19380
Cobertura	0,23807
Distancia a embalses	0,05111
Distancia a Carreteras	0,22836
Pendiente	0,23693

Tabla 4-6 Pesos base sin amenaza. Elaboración propia

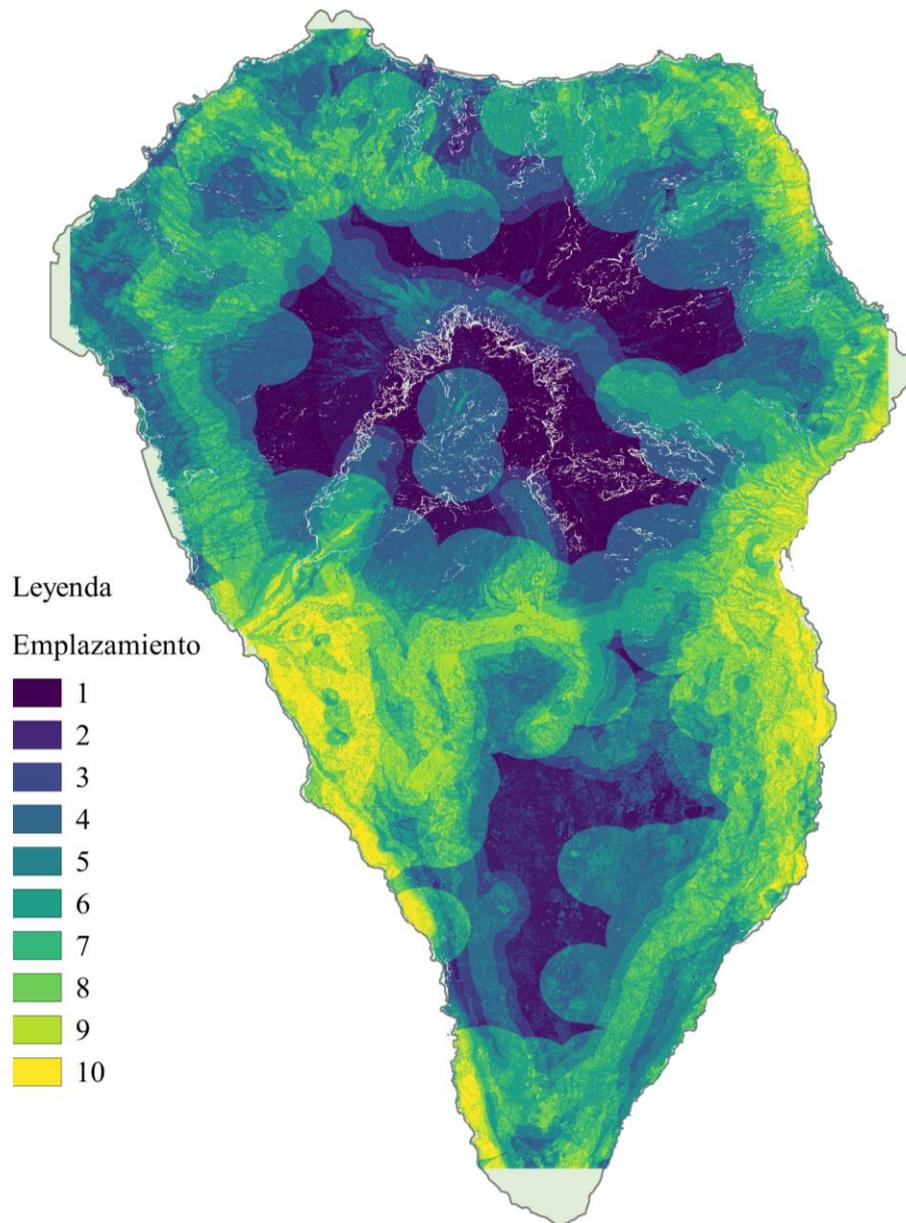


Figura 4-4 Alternativas base militar sin amenaza. Elaboración propia

Al igual que en el apartado 4.1.1, se tuvo que eliminar aquellas zonas donde el uso de suelos no permitía la construcción de la base militar. Esta capa final se muestra en la *Figura 4-5*.

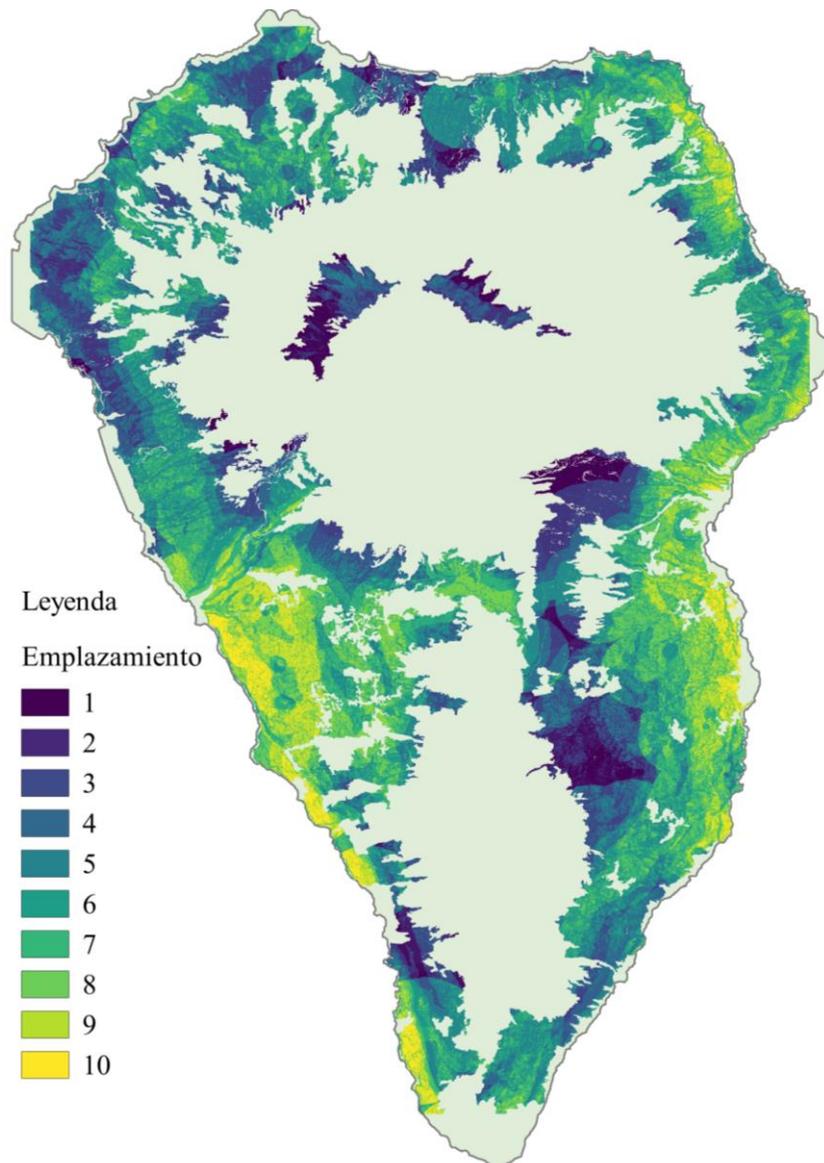


Figura 4-5 Emplazamiento base militar sin amenaza final. Elaboración propia

Se puede observar que con estos criterios, las alternativas de la base militar aumentan debido a que estos son menos restrictivos que en los anteriores casos, especialmente porque ahora no era requisito situarse a una gran distancia de núcleos poblados (apartado 3.6.1).

4.1.4 Base aérea militar

Por último, se realizó un caso estudio para conseguir posibles alternativas para la selección de un emplazamiento para una base aérea. El gran inconveniente con el que contaba este caso, era que el terreno en sí bajo estudio, no era muy propicio para la construcción de esta debido a que se requería que tuviese muy poca pendiente y la naturaleza de la isla era más bien montañosa. Por lo tanto, se demostró que este método sirve también para descartar posibles alternativas debido a que según los criterios, no se obtuvieron resultado idóneos para el emplazamiento.

Al igual que en el resto de casos, se generaron las matrices de comparación pareada (Tabla 4-7) y normalizada (Tabla 4-8) para hallar los pesos de las variables (Tabla 4-9), obteniendo haciendo uso de estas, un valor del RC de 0.087.

	Núcleos de población	Elevación	Cobertura	Distancia a embalses	Distancia a carreteras	Pendiente
Núcleos de población	1,0	1/5	3,0	1,0	1/2	1/7
Elevación	5,0	1,0	4,0	7,0	3,0	1/3
Cobertura	1/3	1/4	1,0	1/3	3,0	1/5
Distancia a embalses	1,0	1/7	3,0	1,0	1/2	1/7
Distancia a Carreteras	2,0	1/3	1/3	2,0	1,0	1/5
Pendiente	7,0	3,0	5,0	7,0	5,0	1,0
TOTAL	16,333	4,926	16,333	18,333	13,000	2,019

Tabla 4-7 Matriz de comparación pareada base aérea. Elaboración propia

	Núcleos de población	Elevación	Cobertura	Distancia a embalses	Distancia a carreteras	Pendiente
Núcleos de población	0,06	0,04	0,18	0,05	0,04	0,07
Elevación	0,31	0,20	0,24	0,38	0,23	0,17
Cobertura	0,02	0,05	0,06	0,02	0,23	0,10
Distancia a embalses	0,06	0,03	0,18	0,05	0,04	0,07
Distancia a Carreteras	0,12	0,07	0,02	0,11	0,08	0,10
Pendiente	0,43	0,61	0,31	0,38	0,38	0,50

Tabla 4-8 Matriz normalizada base aérea. Elaboración propia

	Promedio
Núcleos de población	0,07488
Elevación	0,25528
Cobertura	0,08006
Distancia a embalses	0,07294
Distancia a Carreteras	0,08260
Pendiente	0,43423

Tabla 4-9 Pesos base aérea. Elaboración propia

Se puede observar de la tabla anterior el gran peso que tiene la pendiente en este caso, al igual que la elevación, que aun siendo menor, sigue teniendo un peso importante en comparación con el resto de variables.

Una vez seleccionadas las capas, se implementaron los pesos calculados y se generó la capa final para este caso (*Figura 4-6*).

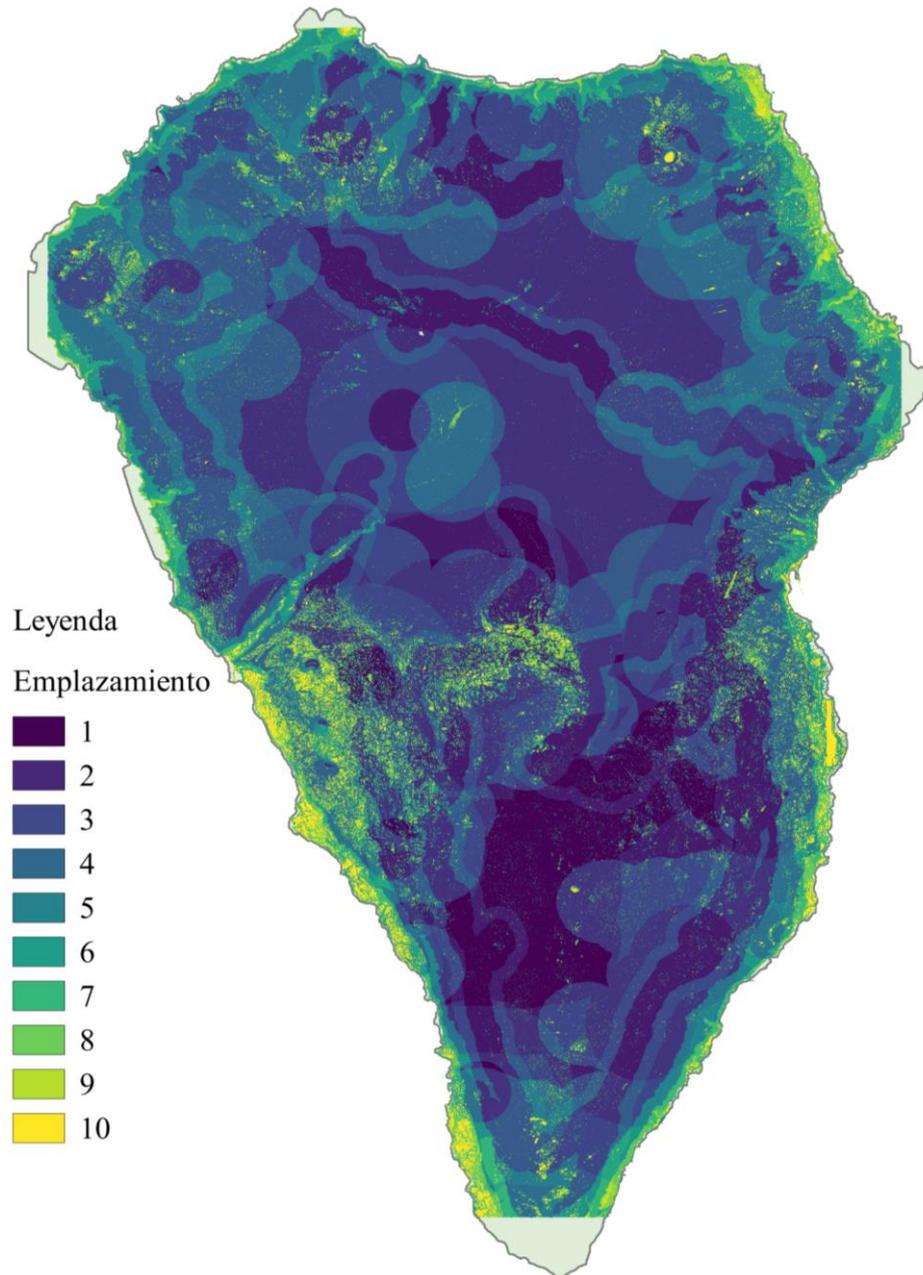


Figura 4-6 Alternativas base aérea militar. Elaboración propia

Se puede observar de la figura anterior, la escasez de alternativas que tendría este territorio para construir una base aérea militar, y aquellas posibles localizaciones, son de pequeña entidad, no siendo suficientes para crear una base militar.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

Para finalizar el presente trabajo se realizará un breve análisis y resumen del trabajo realizado, con la finalidad de extraer conclusiones y detallar las dificultades y limitaciones encontradas durante el desarrollo. Se repasará las etapas del trabajo que han sido realizadas, desde la familiarización del software, continuando por la obtención y procesado de las capas, aplicación del método de análisis multicriterio y por último, los resultados obtenidos

En primer lugar, la familiarización con el software se realizó de manera satisfactoria desde un principio. Una vez se decidió escoger el programa *QGIS*, después de haber estudiado las otras propuestas, se consiguió un rápido entendimiento del mismo gracias a la gran cantidad de tutoriales, ayudas y foros disponibles en Internet. La principal limitación que surgió con respecto al software fue la capacidad de procesamiento que requería el ordenador desde donde se realizó el trabajo, que en ciertas ocasiones, no permitía la ejecución de algunas operaciones, pero que se solucionó de manera sencilla instalándolo en otro ordenador con mejor capacidad de procesamiento.

Con respecto a la obtención y análisis de capas, cabe decir que fueron las etapas del trabajo con mayor importancia y de las cuales surgieron las principales limitaciones del trabajo. La ejecución de este trabajo depende, en casi su totalidad, de los datos que se puedan obtener del territorio que se quiera estudiar. Por lo tanto, se tuvo que descartar la idea original del territorio que se quería estudiar y establecer otro del que se disponían más datos. Esto no fue un gran problema, debido a que el objetivo principal era realizar la optimización de la localización de una base militar, no teniendo gran importancia el lugar donde se realizaba, pero en caso de usar estas técnicas en futuras ocasiones, para un proceso de optimización real, es necesario la obtención de dichas capas de datos para poder realizarlo. Con respecto al procesado de las capas, no hubo mayor inconveniente, ya que todo el proceso se realizó con el software, y que gracias a la familiarización realizada, no supuso inconveniente alguno.

Una vez se realizó las etapas de análisis y procesado de capas, se generó con éxito todos los resultados finales para cada uno de los casos estudios, elaborando una capa para cada uno de ellos, en la cual se establecía mediante una escala de colores aquellos lugares donde fuese más óptimo situar la base militar. Por lo tanto, se consiguió demostrar la eficacia de estas técnicas, consiguiendo establecer una serie de alternativas para el emplazamiento, de manera que no se involucren expediciones al territorio donde se quiere establecer la base militar y con una rapidez mucho mayor, siendo capaz de realizarse desde un ordenador privado que cuente con las herramientas y referencias necesarias.

5.2 Líneas futuras

En el presente apartado se expondrán algunas recomendaciones sobre las acciones que se podrían tomar en el futuro para materializar el trabajo realizado.

Habiendo obtenido las posibles alternativas para el emplazamiento de una base militar, con sus distintas variantes, se considera necesario realizar un estudio con mayor exhaustividad a cerca de estas alternativas para elegir una de ellas en funciones de unos criterios externos a los ya expuestos en esta memoria. Se deberá aplicar criterios económicos de los que dependería la base. Estos criterios son de similar importancia que la localización de la base militar, ya que, si no es económicamente viable, habría que descartar la alternativa elegida antes de continuar con posteriores tratamientos.

Del mismo modo, se considera necesario, dentro de este tratamiento de mayor profundidad de las alternativas, realizar un estudio de posibles fuentes de suministro energético, estudiando igualmente, la viabilidad que tendría, además de la autonomía energética de la que dispondrían dichas posibles localizaciones.

De igual manera, se estima necesario una investigación más a fondo de las necesidades, en términos de extensión del terreno requerido, que debería poseer la base militar, teniendo cuenta el objetivo específico que tendría, al igual que las necesidades logísticas requeridas por la base, en términos de personal que se alojará a bordo, almacenamiento de material y zonas de ejercicios o entrenamientos.

Todos estos criterios ajenos al estudio de la viabilidad geográfica, completarían el estudio necesario para ejecutar la instalación de la base militar.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] L. Gigovic, «The Combination of Expert Judgment and GIS-MAIRCA Analysis for the Selection of Sites for Ammunition Depots,» Belgrade, 2016.
- [2] J. Malczewski, «International Journal of Geographical Information Science,» 20 Febrero 2007. [En línea]. Available: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/13658810600661508>.
- [3] S. Lenagala, *The Analytic Hierarchy Process in GIS-Driven Military Operation Base Selection: A Case Study in Sri Lanka*, Journal of Defense Management, 2017.
- [4] L. U. P. S. CIESAS, «Sistemas de Información Geográfica,» Laboratorio Unidad Pacífico Sur CIESAS, [En línea]. Available: <https://langleruben.wordpress.com/¿que-es-un-sig/>.
- [5] M. Samaniego, «La Pita Verde,» Abril 2014. [En línea]. Available: <http://lapitaverde.es/?p=204>.
- [6] F. J. F. Rodríguez-Guerra, «Calderón Repositorio Institucional del CUDENM,» 01 Octubre 2017. [En línea]. Available: <http://calderon.cud.uvigo.es/bitstream/11621/216/1/FalconRodriguez.pdf>.
- [7] «Modelos para la información Geográfica,» [En línea]. Available: http://volaya.github.io/libro-sig/chapters/Tipos_datos.html.
- [8] D. F. Escobar, P. G. Hunter, P. I. Bishop y D. A. Zerger, «Introduction to GIS,» [En línea]. Available: <https://geogra.uah.es/patxi/gisweb/GISModule/GISTheory.pdf>.
- [9] R. Greene, R. Devillers, J. E. Luther y B. G. Eddy, *GIS-Based Multiple-Criteria Decision Analysis*, Newfoundland: Blackwell Publishing, 2011.
- [10] «Power Data,» [En línea]. Available: <https://www.powerdata.es/big-data>.
- [11] S. Dong, «Comparisons between Different Multi-criteria Decision Analysis Techniques for Disease Susceptibility Mapping,» Department of physical Geography and Ecosystem Science in Lund University, Sölvegatan, 2016.

- [12] T. L. Saaty, *The Analytic Hierarchy Process*, McGraw-Hill, 1980.
- [13] P. Jankowski y L. Richards, «Integration of GIS-Based Suitability Analysis and Multicriteria Evaluation in a Spatial Decision Support System for Route Selection,» de *Environment and Planning B: Planning and Design*, 1994, pp. 323-340.
- [14] «Wikipedia,» 28 Noviembre 2017. [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Proceso_analítico_jerárquico.
- [15] P. Satyanarayana, «Military Applications of GIS,» IIC Technologies Private Limited, Hyderabad.
- [16] J. E. Gutiérrez Palacios. [En línea]. Available: http://cartomap.cl/escuela_militar/Sig/SIG-04.pdf.
- [17] J. C. Cobos, «Encaminados con los SIG,» Mayo 2017. [En línea]. Available: encaminadosconlossig.blogspot.com.es/2017/05/.
- [18] «Konsberg,» [En línea]. Available: <https://www.km.kongsberg.com/ks/web/nokbg0240.nsf/AllWeb/39DAD27FC6D37518C1256E150038656C?OpenDocument>.
- [19] «OSGeo Live,» [En línea]. Available: https://live.osgeo.org/es/overview/qgis_overview.html.
- [20] S. Expósito Rodríguez, «Grupo TYC GIS Formación,» 1 Noviembre 2014. [En línea]. Available: <https://www.cursosgis.com/ventajas-de-utilizar-qgis/>.
- [21] V. Bouzas, «TYS Magazine,» 29 Octubre 2014. [En línea]. Available: <http://www.tysmagazine.com/los-mejores-software-libre-gis/>.
- [22] «Latvian Geospacial Information Agency,» [En línea]. Available: www.lgia.gov.lv/en/Par%20mums/Symbolika.aspx.
- [23] «FreeGis Data,» 3 Enero 2018. [En línea]. Available: <https://freegisdata.rtwilson.com/>.
- [24] C. d. I. Palma, «La Palma Open Data,» [En línea]. Available: <http://www.opendatalapalma.es/>.
- [25] «Centro Nacional de Información Geográfica,» [En línea]. Available: ficheros de información geográfica digital generada por el Instituto Geográfico Nacional (IGN).
- [26] J. F. Pato Gándaras, *Establecimiento de zonas de acción mediante Sistema de Información Geográfica*, Marín, 2015.
- [27] J. Valcarce, «Digimapas Cartografía Digital,» [En línea]. Available: <https://digimapas.blogspot.com.es/2016/12/corine-land-cover-2012.html>. [Último acceso: 17 Febrero 2018].
- [28] J. J. Chevallier y A. Laaribi, «Science Direct,» Noviembre 1996. [En línea]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0198971597000021?via%3Dihub>.
- [29] H. H. Velarde, «Slideshare,» 05 Diciembre 2012. [En línea]. Available: <https://es.slideshare.net/henryhvelarde/historia-y-aplicaciones-de-los-sig>.
- [30] C. M. Duarte, «Blog SIG,» 02 Mayo 2017. [En línea]. Available: <https://www.blogsig.com/2017/05/que-es-un-sig.html>.

- [31] P. .. Gorsevski y G. PE., .V., Jankowski, PHeuristic approach for mapping landslide hazard by integrating fuzzy logic with analytic hierarchy process, 2016.