



UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

Escuela de Ingenierías Industriales
Programa de Doctorado:
Ingeniería Mecánica y Eficiencia Energética

**Modelado 3D de superficies de
campos magnéticos generados por
líneas eléctricas aéreas de alta
tensión en áreas residenciales**

Laia Miravet Garret

DIRECTORES DE TESIS

Dra. Elidia Beatriz Blázquez Parra

Dr. Óscar de Cózar Macías

Málaga, 2024



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

AUTORA: Laia Miravet Garret

 <https://orcid.org/0000-0002-3244-8286>

EDITA: Publicaciones y Divulgación Científica. Universidad de Málaga



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional:

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode>

Cualquier parte de esta obra se puede reproducir sin autorización pero con el reconocimiento y atribución de los autores.

No se puede hacer uso comercial de la obra y no se puede alterar, transformar o hacer obras derivadas.

Esta Tesis Doctoral está depositada en el Repositorio Institucional de la Universidad de Málaga (RIUMA): riuma.uma.es





DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD DE LA TESIS PRESENTADA PARA OBTENER EL TÍTULO DE DOCTOR

D./Dña LAIA MIRAVET GARRET

Estudiante del programa de doctorado INGENIERÍA MECÁNICA Y EFICIENCIA ENERGÉTICA de la Universidad de Málaga, autora de la tesis, presentada para la obtención del título de doctor por la Universidad de Málaga, titulada: MODELADO 3D DE SUPERFICIES DE CAMPOS MAGNÉTICOS GENERADOS POR LÍNEAS ELÉCTRICAS AÉREAS DE ALTA TENSIÓN EN ÁREAS RESIDENCIALES.

Realizada bajo la tutorización de DRA. ELIDIA BEATRIZ BLÁZQUEZ PARRA y dirección de DRA. ELIDIA BEATRIZ BLÁZQUEZ PARRA Y DR. ÓSCAR DAVID DE CÓZAR MACÍAS.

DECLARO QUE:

La tesis presentada es una obra original que no infringe los derechos de propiedad intelectual ni los derechos de propiedad industrial u otros, conforme al ordenamiento jurídico vigente (Real Decreto Legislativo 1/1996, de 12 de abril, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Propiedad Intelectual, regularizando, aclarando y armonizando las disposiciones legales vigentes sobre la materia), modificado por la Ley 2/2019, de 1 de marzo.

Igualmente asumo, ante a la Universidad de Málaga y ante cualquier otra instancia, la responsabilidad que pudiera derivarse en caso de plagio de contenidos en la tesis presentada, conforme al ordenamiento jurídico vigente.

En Málaga, a 17 de abril de 2024

Fdo.: LAIA MIRAVET GARRET Doctoranda	Fdo.: ELIDIA BEATRIZ BLÁZQUEZ PARRA Tutora
Fdo.: ELIDIA BEATRIZ BLÁZQUEZ PARRA Directores de tesis	ÓSCAR DAVID DE CÓZAR MACÍAS





AUTORIZACIÓN DE LA LECTURA DEL TUTORA Y DIRECTORES DE TESIS

PROGRAMA DE DOCTORADO	Ingeniería Mecánica y Eficiencia Energética
CENTRO RESPONSABLE	Escuela de Ingenierías Industriales / Universidad de Málaga
DOCTORANDO	Laia Miravet Garret

Dra. Elidia Beatriz Blázquez Parra, tutora y directora, y Dr. Óscar D. de Cózar Macías, director, y miembros del departamento de Expresión Gráfica Diseño y Proyectos de la Universidad de Málaga,

INFORMAN que:

Que Dña. LAIA MIRAVET GARRRET ha realizado bajo nuestra dirección, en el Programa de Doctorado: Ingeniería Mecánica y Eficiencia Energética de la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Málaga el trabajo de investigación titulado: MODELADO 3D DE SUPERFICIES DE CAMPOS MAGNÉTICOS GENERADOS POR LÍNEAS ELÉCTRICAS AÉREAS DE ALTA TENSIÓN EN ÁREAS RESIDENCIALES.

Y una vez finalizado y examinado dicho trabajo de investigación, y habiendo corroborado que las publicaciones en coautoría que la avalan no han sido utilizadas en tesis anteriores, AUTORIZAN su presentación por considerar que reúne todos los requisitos formales y científicos legalmente establecidos para que la doctoranda obtenga el título de Doctora por la Universidad de Málaga.

Y para que así conste y surta los efectos oportunos, donde proceda, expiden y firman el presente informe en Málaga a 17 de abril de dos mil veinticuatro.

Atentamente,

Fdo: Elidia Beatriz Blázquez Parra
Tutora/Directora

Fdo: Óscar D. de Cózar Macías
Director





UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



Departamento de
Expresión Gráfica,
Diseño y Proyectos

UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA





UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

PROGRAMA DE DOCTORADO:

INGENIERÍA MECÁNICA Y EFICIENCIA ENERGÉTICA

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

REPUTACIÓN CORPORATIVA, DISEÑO Y REPRESENTACIÓN EN
INGENIERÍA MECÁNICA

CURSO 2023-2024

**MODELADO 3D DE SUPERFICIES DE CAMPOS
MAGNÉTICOS GENERADOS POR LÍNEAS ELÉCTRICAS
AÉREAS DE ALTA TENSIÓN EN ÁREAS RESIDENCIALES**

LAIA MIRAVET GARRET

Director/a de la Tesis:

Dra. Elidia Beatriz Blázquez Parra

Dr. Óscar David de Cózar Macías

Departamento de Expresión Gráfica, Diseño y Proyectos



AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría expresar mi agradecimiento a todos mis compañeros del Departamento de Expresión Gráfica, Diseño y Proyectos de la Universidad de Málaga, no sólo por el apoyo y el ánimo que me han brindado durante todo este tiempo de intenso trabajo que conlleva una tesis doctoral, sino por todo el cariño y el acogimiento que han tenido conmigo desde el primer día que empecé como docente. Además de excelentes compañeros, todos ellos son para mí un verdadero ejemplo de vocación docente y profesionalidad.

De forma especial quiero mostrar mi agradecimiento a mis directores de tesis, Dr. Óscar de Cózar Macías y Dra. Beatriz Blázquez Parra, por su constante acompañamiento y dedicación para ayudarme en todo momento. Sus aportaciones y revisiones han sido una ayuda inestimable.

Así mismo, quiero mencionar a Manuel Marín Granados, por abrirme las puertas de la investigación en un ámbito que me apasiona. Siempre le estaré agradecida por ello.

También quiero mostrar mi más sincero agradecimiento a Juan Bernabé García González y a Rafael Molina Maldonado, profesores del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de la Málaga, por todo su asesoramiento técnico y por todas las horas compartidas en los trabajos de campo.

A mi familia, a los que están y a los que ya no, y como no, a mis amigas de siempre, mis “Cármenes” y Elena, las mejores compañeras de vida que se pueda tener, que una vez más como otras tantas han vuelto a estar ahí.

A Javi, Guille y María

RESUMEN

La exposición residencial a campos magnéticos (CM) generados por líneas eléctricas aéreas de alta tensión es, desde hace varias décadas, un tema de preocupación social. A pesar del importante número de estudios epidemiológicos que se han desarrollado hasta la fecha, todavía no existe un consenso en la comunidad científica sobre sus posibles efectos sobre la salud, por lo que son necesarias más investigaciones. Una de las principales dificultades inherente a todos estos estudios es la dificultad que supone modelar la exposición de las personas a CM con la suficiente precisión como para detectar de manera confiable incluso efectos pequeños en grandes poblaciones complejas y áreas territoriales diversas.

En el cálculo del valor del CM, la distancia entre las ubicaciones donde se quiere estimar la exposición y las líneas eléctricas es una variable determinante. Su definición precisa requiere la consideración tanto del pando de la línea eléctrica como del relieve del terreno. Sin embargo, los estudios epidemiológicos de exposición residencial a CM, debido a su complejidad, adoptan diversas simplificaciones o generalizaciones sobre estos parámetros o incluso son directamente obviados. Por otra parte, la medición directa de distancias requiere una inversión de recursos y tiempo considerables.

En esta tesis doctoral se desarrolla, mediante un Sistema de Información Geográfica (SIG), una superficie de valores de CM generado por líneas eléctricas aéreas a partir de un modelado geográfico 3D, el cual incluye la representación de la catenaria que describen los cables, así como datos topográficos de alta precisión disponibles para el público en general. De esta forma, las distancias reales entre los puntos del terreno y la línea eléctrica y, en consecuencia, el valor del campo magnético a cualquier cota real se puede reproducir con gran precisión incluso en zonas con relieves geográficos complejos. Esta metodología permite no sólo analizar territorialmente el error que se comete al recurrir a diversas simplificaciones de la distancia habituales en estudios epidemiológicos sino que permite proporcionar tanto valores de CM en ubicaciones precisas como salidas gráficas continuas de estos valores en forma de mapas 2D y 3D, los cuales pueden ser utilizados como herramienta informativa y como entradas de análisis multicriterio espaciales necesarios tanto en epidemiología ambiental como en la planificación del trazado de líneas eléctricas.

Esta tesis doctoral se ha llevado a cabo basándose en el estado de conocimiento actual de las disciplinas en las que se fundamenta, a saber, el cálculo del CM generado por líneas eléctricas aéreas, el modelado 3D con SIG y las metodologías para la estimación de la exposición residencial a CM y ha sido validada mediante trabajos prácticos de investigación.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Justificación.....	1
1.2. Objetivos y alcance	4
1.3. Motivación	6
1.4. Estructura	8
2. CÁLCULO Y MEDICIONES DEL CAMPO MAGNÉTICO GENERADO POR LEAAT 11	
2.1. Descripción general de los campos electromagnéticos	11
2.2. Campos magnéticos generados por LEAAT	16
2.2.1. Redes eléctricas de transmisión y distribución: características generales y estado actual global	16
2.2.2. Definición de LEAAT.....	21
2.2.2.1. Características principales	21
2.2.2.2. Definición de la catenaria descrita por una LEAAT	24
2.2.3. Características particulares de los CM generados por LEAAT	26
2.2.3.1. Dirección del CM generado por una LEAAT	26
2.2.3.2. Variables que afectan al CM	27
2.2.3.3. Técnicas de mitigación del CM	36
I. Técnicas intrínsecas	38
II. Técnicas extrínsecas.....	39
2.3. Mediciones de campos magnéticos	43
2.4. Cálculo de campos magnéticos	46
2.4.1. Procedimientos 2D	46
2.4.2. Procedimientos 3D y 2D optimizados	49
2.4.2.1. Procedimientos 2D optimizados	50
2.4.2.2. Procedimientos 3D.....	52
2.4.3. Comparación entre procedimientos 2D y 3D	53
2.4.4. Otros procedimientos del cálculo del CM generado por LEAAT	57
2.4.5. Salidas gráficas tridimensionales del cálculo del CM	58
2.5. Conclusiones del capítulo.....	59
3. MODELADO 3D CON SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA	61
3.1. Modelos digitales de elevaciones.....	61
3.1.1. Definición del modelo digital de elevaciones.....	61
3.1.2. Precisión de los MDE.....	63
3.1.3. Disponibilidad de datos LIDAR y productos derivados.....	67
3.2. Modelado 3D de líneas eléctricas aéreas de alta tensión.....	69
3.3. Modelado espacial de contaminantes ambientales mediante SIG.....	82

3.3.1.	Principales funcionalidades de los SIG 2D en modelado ambiental	82
3.3.2.	Principales funcionalidades de los SIG 3D en modelado ambiental	85
3.4.	Conclusiones del capítulo.....	94
4.	METODOLOGÍAS PARA LA ESTIMACIÓN DE LA EXPOSICIÓN RESIDENCIAL A CM FEB. APLICACIONES DE LOS SIG	95
4.1.	La exposición residencial a CM FEB.....	95
4.1.1.	Definición de la exposición.....	95
4.1.2.	Normativa y recomendaciones sobre límites de exposición.....	100
4.1.2.1.	Situación legal en diferentes países	103
4.1.3.	La necesidad de evaluar la exposición de las personas a los CM FEB	104
4.2.	Metodologías para la estimación de la exposición a CM. Evolución y aportaciones de los Sistemas de Información Geográfica.....	108
4.2.1.	Código de cables.....	111
4.2.1.1.	Evolución de la implementación del método Código de Cables	114
4.2.2.	Distancia a la línea eléctrica o a una fuente de CM FEB	118
4.2.2.1.	Evolución de la implementación del método de distancias	121
4.2.2.2.	Validaciones del método de distancias	126
4.2.3.	Niveles de CM calculados	129
4.2.3.1.	Modelado de datos de carga históricos de las líneas eléctricas	131
4.2.3.2.	Modelado de datos geométricos intrínsecos de las líneas eléctricas	133
4.2.3.3.	Modelado de la distancia a las líneas eléctricas	134
4.2.3.4.	Evolución del modelado en el cálculo del CM. Aplicaciones de los SIG	139
4.2.3.5.	Consideraciones habituales para el cálculo del CM en estudios epidemiológicos	149
4.2.3.6.	Validaciones de los modelos basados en cálculos del CM	152
4.2.4.	Niveles de CM medidos	155
4.3.	Conclusiones del capítulo.....	160
5.	ANÁLISIS DEL ERROR DE LA SIMPLIFICACIÓN DE DISTANCIAS A LEAAT MEDIANTE UN SIG 3D.....	162
5.1.	Introducción	162
5.1.1.	Justificación.....	162
5.1.2.	Tipos de distancias analizadas	163
5.1.3.	Zona de estudio	164
5.2.	Metodología	166
5.2.1.	Fuentes de información: datos tridimensionales, vectoriales e imágenes aéreas	166
5.2.2.	Modelado 3D de la zona de estudio	168
5.2.2.1	Modelo de la catenaria: digitalización de la línea eléctrica aérea en 2D.....	168

5.2.2.2. Modelo de la catenaria: digitalización de la línea eléctrica aérea en 3D.....	169
I. Determinación de la altura ortométrica H_1 del centro geométrico de los conductores	172
II. Determinación de la ordenada y de cualquier punto en el sistema local de la catenaria	173
III. Definición de la altura ortométrica de cada punto	179
5.2.3. Validación del modelado	183
5.2.4. Generación de las superficies de error.....	187
5.3. Resultados	197
5.4. Discusión.....	202
5.5. Conclusiones del capítulo.....	203
6. MODELADO DE SUPERFICIES DE CAMPO MAGNÉTICO MEDIANTE UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA 3D	205
6.1. Introducción	205
6.1.1. Justificación.....	205
6.1.2. Zona de estudio	208
6.2. Metodología	208
6.2.1. Fuentes de información: datos tridimensionales, vectoriales e imágenes aéreas	208
6.2.2. Método de cálculo del campo magnético	210
6.2.3. Modelado de la zona de estudio	212
6.2.4. Modelado de la superficie de campo magnético	213
6.2.5. Validación de la superficie de campo magnético.....	220
6.2.5.1. Procedimientos de medición de valores del campo magnético	220
I. Muestreo basado en procedimientos normalizados	221
II. Muestreo de puntos aleatorios	223
III. Asignación de valores de campo magnéticos simulados a los puntos de la muestra	225
6.3. Resultados	226
6.3.1. Análisis de regresión lineal	226
6.3.2. Análisis de diferencias entre valores medidos y simulados.....	233
6.4. Discusión.....	235
6.5. Conclusiones del capítulo.....	241
7. CONCLUSIONES	244
8. BIBLIOGRAFÍA.....	249
9. ANEXOS.....	272
ANEXO I: Estatus legislativo de límites de exposición residencial a CM FEB en diferentes países. Fuente: adaptado de Rianne, 2018; WHO, 2023.	273
ANEXO II: Registro de medidas de la inducción magnética en cada eje para cada ubicación en la muestra distribuida en perfiles transversales.....	276

ANEXO III: Registro de medidas de la inducción magnética en cada eje para cada ubicación en la muestra de ubicaciones aleatorias. 289

ANEXO IV: Coordenadas geográficas de cada ubicación de medida, inducción magnética resultante en cada eje y módulo total e intensidad de corriente en la línea según hora de medida. 293

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1. Representación del espectro electromagnético. Fuente: Instituto Nacional del Cáncer, 2018	13
Figura 2. 2. Esquema básico del sistema eléctrico. Fuente: Red Eléctrica Española, 2023	16
Figura 2. 3. Línea eléctrica de alta tensión en Málaga. Fuente: Jiménez, 2023	19
Figura 2. 4. Longitudes de circuitos de líneas eléctricas en varios países. Fuente: Kalt et al., 2021	20
Figura 2. 5. Líneas de simple y doble circuito con circuitos simplex, doble, triple y cuádruple. Fuente: Vidal Blanco, 2017	22
Figura 2. 6. Esquema de transposición de fases. Fuente: EMF.info, 2023	23
Figura 2. 7. Esquema de catenaria. Fuente: Moreno Clemente, 2004	26
Figura 2. 8. Polarización del campo magnético para una línea eléctrica con configuración tipo delta. Fuente: EMFs.info, 2023	27
Figura 2. 9. Niveles de campo magnético según diferentes configuraciones de fases de una línea de circuito simple. Fuente: Sid Ahmed et al., 2022	28
Figura 2. 10. Niveles de campo magnético para configuraciones en triángulo de una línea de circuito doble. Fuente: Kostyszyn & Miśków, 2022	29
Figura 2. 11. Niveles de campo magnético para división de fase en dipolo (a) o cuadrupolo (b). Fuente: Bravo-Rodriguez et al., 2019	30
Figura 2. 12. Niveles de campo magnético según diferentes voltajes (imagen izq.) y para diferentes intensidades de corriente. Fuente: EMFs.info, 2023	31
Figura 2. 13. Niveles de campo magnético según resistividades del terreno. Fuente: EMFs.info, 2023	33
Figura 2. 14. Niveles de campo magnético directos, con corrientes desequilibradas y por imagen. Fuente: EMFs.info, 2023	34
Figura 2. 15. Niveles de campo magnético para diferentes alturas de los conductores sobre el suelo. Fuente: Kostyszyn & Miśków, 2022	36
Figura 2. 16. Configuraciones óptimas de fases para la reducción del CM en líneas de doble circuito. Fuente: Bravo-Rodríguez et al., 2019	39
Figura 2. 17. Esquema de bucle pasivo (imagen izquierda) y aplicación real (imagen derecha). Fuente: Lee et al. 2011	40
Figura 2. 18. Imagen de recubrimiento de edificio mediante lacas conductoras Fuente: Bavastro et al. 2015	41
Figura 2. 19. Gráfica de factor de blindaje con un escudo ferromagnético y otro conductor. Fuente: Bavastro et al., 2015	42
Figura 2. 20. Bucle de compensación activa instalado en la cubierta en un edificio. Fuente: Shenkman et al., 2005	43
Figura 2. 21. Propuesta de segmentación de la catenaria en elementos rectos. Fuente: Geri et al., 1995	50
Figura 2. 22. Propuesta de segmentación de la catenaria en puntos. Fuente: Dezelak et al., 2011	51
Figura 2. 23. Modelado del CM mediante un método de cálculo 2D (imagen izquierda) y 3D (imagen derecha). Fuente: Modrić et al., 2015a	54
Figura 2. 24. Modelado del CM dado por dos vanos que forman ángulo. Fuente: El Dein, 2009	55
Figura 2. 25. Modelado del CM dado por dos vanos que forman ángulo. Fuente: El Dein, 2009	56
Figura 2. 26. Maqueta para el cálculo del CM. Fuente: Escobar et al., 2007	57
Figura 2. 27. Salida gráfica del volumen de seguridad de CM en el entorno de una LEAAT. Fuente: Morro & Turri, 2012	58
Figura 2. 28. Salida gráfica del modelado del edificio y de los valores de CM resultantes. Fuente: Tong et al., 2016	59
Figura 3. 1. Superficies de referencias de elevación. Fuente: Junta de Extremadura, 2023	61
Figura 3. 2. Ejemplo de representación del mismo área mediante un MDT (izquierda) y un MDS (derecha). Fuente: PNOA, 2023	62
Figura 3. 3. Mapa del sistema eléctrico peninsular de España. Fuente: IGN, 2023	69
Figura 3. 4. Mapa interactivo de la red de transmisión mediterránea y europea. Fuente: ENTSO-E, 2023	70

Figura 3. 5. Mapa interactivo de la red eléctrica nacional de EE. UU. Fuente: Esri U.S Federal Datasets, 2023	71
Figura 3. 6. Componentes de una línea eléctrica y tipos de apoyos y modelado con datos LIDAR. Fuente: Ortega et al., 2019	73
Figura 3. 7. Clasificación, posicionamiento y modelado de una línea eléctrica mediante datos LIDAR. Fuente: R. Zhang et al., 2019	75
Figura 3. 8. Procesado de nube LIDAR en zona urbana para extracción de puntos de LEAAT. Fuente: Guan et al., 2016	77
Figura 3. 9. Aplicación SIG 3D para la visualización y consulta de LEAAT. Fuente: Yang et al., 2010	79
Figura 3. 10. Escena 3D a partir de puntos LIDAR y clasificación de los puntos correspondiente a las LEAAT (color amarillo) mediante ArcGIS. Fuente: ESRI., 2023	80
Figura 3. 11. Escenas 3D de LEAAT generadas mediante ArcGIS. Fuente: ESRI., 2023	81
Figura 3. 12. Ejemplos de estructuras de capas vóxel. Fuente: ESRI., 2023	87
Figura 3. 13. Capa vóxel del Servicio Geológico de los Países Bajos (imagen superior) y capa marina de saturación de oxígeno con sección transversal e isosuperficies. Fuente: ESRI., 2023	88
Figura 3. 14. Resultados de análisis multicriterio espacial 3D para residentes de edificios. Fuente: Munn & Dragičević, 20213	89
Figura 3. 15. Mapa 3D de niveles de concentración de ozono a 300 m sobre el suelo en los cruces de carreteras en la ciudad de Praga. Fuente: Lubos et al., 20063	90
Figura 3. 16. Mapa de ruido ajustado sobre un MDS. Fuente: Dubey et al., 2022	92
Figura 3. 17. Serie temporal de mapas 3D de aerosoles mediante SIG 3D. Fuente: Wong et al., 2009	93
Figura 4. 1. Niveles de CM medidos y calculados en una línea de doble circuito en España. Fuente: Garrido et al., 2003	98
Figura 4. 2. Reclasificación del sustituto de la exposición “código de cables”. Fuente: Ebi et al., 1999	115
Figura 4. 3. Flujo de trabajo para la determinación de distancias mediante un SIG para un estudio epidemiológico de California. Fuente: Kheifets et al, 2015	123
Figura 4. 4. Metodología mediante un SIG para determinar la población expuesta a CM. Fuente: Deshayes-Pincon et al., 2023	125
Figura 4. 5. Representación gráfica del CM mediante el SIG EMF Atlas. Fuente: Najjar et al., 2009	140
Figura 4. 6. Representación gráfica del CM mediante aplicaciones integradas en QSIG. Fuente: Joseph et al., 2018	141
Figura 4. 7. Representación de tres áreas de influencia de niveles de CM según alturas de edificios. Fuente: Marín Granados., 2012	142
Figura 4. 8. Representación gráfica del CM mediante el programa PHIDEL. Fuente: Comelli et al., 2007	143
Figura 4. 9. Representación gráfica del CM considerando la altitud del terreno mediante el programa PHIDEL. Fuente: Comelli et al., 2007	144
Figura 4. 10. Representación gráfica 3D del CM mediante isosuperficies. Fuente: Comelli et al., 2008	145
Figura 4. 11. LEAAT clasificadas en diferentes colores según la afectación del CM sobre la población y edificios circundantes. Fuente: Comelli et al., 2008	146
Figura 4. 12. Mallas de puntos para el cálculo del CM en Ljubljana (Eslovenia). Fuente: Zagar et al., 2023	148
Figura 4. 13. Representación gráfica de los niveles del CM en una zona de Ljubljana (Eslovenia). Fuente: Zagar et al., 2023	149
Figura 5. 1. Simplificaciones habituales de la distancia geométrica en estudios epidemiológicos de CM FEB	164
Figura 5. 2. Imagen de la zona de estudio. Fuente: Google, s.f.	165
Figura 5. 3. Detalles de la línea eléctricas “Montes-Centro”	166
Figura 5. 4. Extracto de ortofoto aérea de la zona de estudio. Fuente: adaptado de IGN, 2023	167
Figura 5. 5. LEAAT “Montes_centro” digitalizada y tabla de datos asociada a los apoyos	169

Figura 5. 6. Discretización de la catenaria en puntos cada 0.5 metros en torno al apoyo número 7	170
Figura 5. 7. Esquema de referenciación de las ordenadas de los puntos de la catenaria como altitudes ortométricas	171
Figura 5. 8. Esquema de determinación de la altitud ortométrica del centro geométrico de los conductores	172
Figura 5. 9. Cálculo mediante el programa informático ArcMap de la altura ortométrica del centro geométrico de los conductores en cada apoyo	173
Figura 5. 10. Trazado de la línea eléctrica y datos asociados	175
Figura 5. 11. Mapa de discretización del vano 7-8 de la catenaria y ejemplo consulta de atributos de los puntos seleccionados	176
Figura 5. 12. Modelado 3D de zona de estudio representada mediante ArcScene	180
Figura 5. 13. Flujo de trabajo para modelado 3D de la catenaria	182
Figura 5. 14. Trabajos de campo con estación total	183
Figura 5. 15. Esquema para el cálculo de la distancia al centro geométrico de los conductores mediante una doble observación	184
Figura 5. 16. Hoja de cálculo de las distancias para los puntos de control	185
Figura 5. 17. Mapa de puntos de control y datos asociados	186
Figura 5. 18. Extracto de la tabla alfanumérica de la capa de puntos de la catenaria con valores de elevación del suelo	189
Figura 5. 19. Ejemplo de indexación de los atributos de la catenaria a los puntos de la malla	190
Figura 5. 20. Extracto de la tabla alfanumérica de la capa de la malla con valores de error de distancia	191
Figura 5. 21. Ejemplo de consulta de puntos de la malla seleccionados	192
Figura 5. 22. Diagrama de flujo de trabajo para obtener las superficies de error	193
Figura 5. 23. Comparación de los mapas de error de cada de modelo	194
Figura 5. 24. Mapa de error del Modelo A.	194
Figura 5. 25. Mapa de error del modelo B	196
Figura 5. 26. Gráfica de valores absolutos porcentuales máximos y medios según la distancia horizontal a la línea	198
Figura 5. 27. Mapa de error absoluto porcentual para los Modelos A y B en la zona de 50 a 100 m a la línea eléctrica.	199
Figura 5. 28. Gráfica del valor del campo magnético según la altura de los cables al suelo en una línea de 400 kV. Fuente: adaptado de EMFs.info, 2023	202
Figura 6. 1. Representación de la posición relativa entre un punto de cálculo y el centro geométrico de los conductores de la catenaria	211
Figura 6. 2. Variación horaria de la intensidad de corriente en cada circuito de la línea eléctrica	211
Figura 6. 3. Representación tridimensional de la catenaria obtenida a partir del MDT 05 (color negro) y a partir del MDT 25 (color verde)	213
Figura 6. 4. Comparación de las mallas de 5, 10 y 25 m sobre los MDT	215
Figura 6. 5. Datos de altitud ortométrica, distancia geométrica e inducción magnética asociados a los puntos de una malla	216
Figura 6. 6. Extracto de mapa de superficies de campo magnético generadas	217
Figura 6. 7. Visualización 3D de la superficie de CM 5 x 5 m estimada a 1 m sobre el MDT05	218
Figura 6. 8. Flujo de trabajo para generar las superficies de campo magnético	219
Figura 6. 9. Muestra de valores de campo magnético medido distribuidos en perfiles transversales	222
Figura 6. 10. Muestra de valores de campo magnético medido distribuidos de forma aleatoria	224
Figura 6. 11. . Extracto de la tabla alfanumérica correspondiente a la muestra de valores de campo magnético aleatoria	226
Figura 6. 12. Gráficas de dispersión de las superficies de CM generadas a partir de las diferentes mallas en cada zona	231
Figura 6. 13. Gráficas comparativas de los valores de campo magnético medidos y modelados en perfiles transversales a la línea	235

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2. 1. Potencias habituales de trabajo de redes eléctricas en diferentes países. Fuente: adaptado de Kalt et al., 2021	17
Tabla 2. 2. Medidas de mitigación del CM generado por una LEAAT.	37
Tabla 3. 1. Métodos de generación de MDE y principales características. Fuente: adaptado de Wani & Nagai, 2021	64
Tabla 4. 1. Valores habituales de campo magnético generado por diversos electrodomésticos. Fuente: adaptada de EPRI, 2023	96
Tabla 4. 2. Valores habituales de campo magnético generado por LEAAT. Fuente: adaptada de IARC, 2002	97
Tabla 4. 3. Parámetros requeridos para el cálculo del nivel de exposición a CM FEB	130
Tabla 5. 1. Lista de variables incluidas en la hoja de cálculo para la determinación de la elevación ortométrica de la catenaria	177
Tabla 5. 2. Errores del modelado	187
Tabla 5. 3. Análisis estadístico de los errores del modelado	187
Tabla 5. 4. Análisis del error de los Modelos A y B según distancias horizontales a la línea	197
Tabla 5. 5. Porcentaje de territorio afectado el Modelo A según distancias horizontales a la línea eléctrica	200
Tabla 5. 6. Porcentaje de territorio afectado el Modelo B según distancias horizontales a la línea eléctrica	201
Tabla 6. 1. Resumen de resultados observados en la muestra distribuida en perfiles transversales	223
Tabla 6. 2. Resumen de resultados observados en zona libre y en la residencial	225
Tabla 6. 3. Análisis de regresión lineal de la muestra en perfiles para la superficie de CM 5 x 5 m MDT05	227
Tabla 6. 4. Análisis de regresión lineal de la muestra en perfiles para la superficie de CM 10 x 10 m MDT05	228
Tabla 6. 5. Análisis de regresión lineal de la muestra en perfiles para la superficie de CM 25 x 25 m MDT25	229
Tabla 6. 6. Análisis de regresión lineal de la muestra aleatoria para la superficie de CM 5 x 5 m MDT05	230
Tabla 6. 7. Análisis de regresión lineal de la muestra aleatoria para la superficie de CM 10 x 10 m MDT05	231
Tabla 6. 8. Análisis de regresión lineal de la muestra aleatoria para la superficie de CM 25 x 25 m MDT25	231
Tabla 6. 9. Resumen de los análisis estadísticos de diferencias y de regresión lineal para la validación del modelo	234

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Justificación

Los campos electromagnéticos (CEM) se encuentran en la naturaleza desde el origen del universo, pero a medida que la humanidad ha ido incorporando a su existencia diversos avances tecnológicos, han aparecido nuevas fuentes de estos campos. Una de las más importantes son las relacionadas con el actual uso intensivo de la electricidad, que tiene lugar en todas las facetas del nuestro ámbito cotidiano, ya sea industrial, laboral o doméstico. Concretamente, las líneas eléctricas aéreas de alta tensión (LEAAT) constituyen una fuente de campos electromagnéticos de frecuencia extremadamente baja (CEM FEB). El crecimiento de la demanda de electricidad cada vez mayor en todas las poblaciones ha incrementado la construcción de estas líneas y la creciente tendencia de urbanización da lugar a que cada vez más población resida en su entorno, por lo que los efectos que puedan causar en las personas la exposición a estos campos se ha convertido en un tema de preocupación social (Grellier et al., 2014; M. Repacholi, 2012). Mientras que los campos eléctricos generados por líneas eléctricas son atenuados o disipados por los árboles, las fachadas de los edificios y otra construcciones de manera que su efecto es menor en el interior de las viviendas que el causado por los aparatos y cableado doméstico (National Radiological Protection Board [NRPB], 2001; World Health Organization [WHO], 2023), los campos magnéticos no se ven afectados en absoluto por estos elementos.

Según varios estudios científicos, el electro smog (exposición continuada a radiaciones y/o campos electromagnéticos existentes en el ambiente) puede ocasionar en las personas diversas enfermedades de tipo neurológico como alzhéimer, demencia, síndrome de fatiga crónica o fibromialgia, así como otras relacionadas con el estrés oxidativo celular que pueden derivar en efectos genotóxicos y daños irreparables en el ADN (Rifai & Hakami, 2014).

En las últimas décadas muchos estudios epidemiológicos (Research Center for Bioelectromagnetic Interaction [FEMU], 2023) han explorado la posible asociación entre los campos magnéticos (CM) generados por LEAAT y la susceptibilidad de las personas

a diferentes enfermedades, y de forma más intensiva al cáncer, principalmente leucemia, cáncer de mama y tumores cerebrales, pero los resultados han sido muy dispares entre estudios. Por otra parte, los estudios de laboratorio con animales tampoco han sido concluyentes (Zhang et al., 2016). Una de las enfermedades más investigadas mediante estudios epidemiológicos y que han mostrado en varios de ellos una asociación a la exposición a estos campos es la leucemia infantil (Ahlbom et al., 2000; Greenland et al., 2000).

Por estas razones, desde el año 2002, los CM FEB se encuentran incluidos dentro de la clasificación de compuestos o factores físicos evaluados por la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) como Grupo 2B o “posiblemente carcinógeno para los humanos” (IARC, 2002). Esta determinación se aplica cuando existen pruebas limitadas de la carcinogenicidad en humanos, pero los estudios de laboratorio sobre animales son insuficientes para explicar y concluir este riesgo. En el año 2016 se llevó a cabo una revisión de toda la evidencia científica disponible hasta el momento y en ella se estableció mantener esta categorización del riesgo (Schüz et al., 2016).

En el documento 12608 de la Asamblea Parlamentaria del Consejo de Europa (PACE) (PACE, 2011) se recoge que existen indicios suficientes acerca de la evidencia de los efectos potencialmente nocivos de los CEM sobre la flora, la fauna y la salud de las personas que requieren tanto la búsqueda de respuestas como una prevención de los riesgos ambientales y de salud potencialmente graves.

La Organización Mundial de la Salud (WHO, por sus siglas en inglés) también realizó una evaluación de la evidencia científica de los posibles efectos de los CEM en la salud resaltando que “prácticamente todas las pruebas de laboratorio y las pruebas mecánicas no respaldan” la asociación estadística informada entre CM FEB y la leucemia infantil y que las asociaciones estadísticas encontradas “se encuentran debilitadas por problemas metodológicos” (WHO, 2007). Caracterizar y cuantificar la exposición de las personas a CM con una precisión capaz de detectar posibles efectos, aunque estos sean muy pequeños en grandes y diversas poblaciones, supone una tarea de enorme complejidad.

Dada la falta de consenso en la comunidad científica y la necesidad de respuestas de la sociedad en general, las diversas comisiones de investigación sostienen que es necesario seguir investigando con el fin de determinar si los riesgos encontrados en los estudios epidemiológicos tienen realmente una base causal debida a los CM (SCENIHR, 2015; Swedish Radiation Safety Authority, 2022; EPRI, 2024).

Algunos autores (Bürigi et al., 2017) han sugerido también que las discrepancias entre estudios puede ser debida a la falta de un método para evaluar la exposición de las personas a CM FEB que esté validado y estandarizado. Uno de los métodos aplicados en numerosos estudios y considerados de mayor confiabilidad son los basados en cálculos de la intensidad del campo magnético (Ahlbom et al., 2001; IARC, 2002) . Sin embargo, estos mismos investigadores demuestran que para generar modelos computarizados de cálculo confiables en epidemiología ambiental resulta indispensable la consideración del relieve del terreno mediante superficies digitales del terreno de alta precisión. Esto es debido a que la intensidad del campo magnético en cualquier punto del espacio generado por una línea eléctrica es función de la intensidad de la corriente en sus circuitos, de la configuración de las fases y de la distancia geométrica desde dicho punto a los conductores. La relación de los valores de la intensidad del CM con este último parámetro es de tipo exponencial, lo que conlleva una rápida caída del campo conforme se incrementa el alejamiento a la línea eléctrica y, por tanto, los errores en las estimaciones de exposición a CM basadas en cálculos se encuentran fuertemente ligados a los errores en la determinación de las distancias. En consecuencia, un modelo geográfico para la estimación de los valores del CM debe aspirar a tener una consideración completamente tridimensional, donde la geometría de la línea y su pandeo, la morfología del terreno y en particular, la distancia relativa entre los puntos de cálculo y los conductores de la línea eléctrica se reproduzcan fielmente y, de manera particular, en el entorno más cercano a la línea.

Sin embargo, la mayoría de los estudios epidemiológicos de exposición residencial a CM, independientemente de la metodología aplicada para caracterizar esta exposición, adoptan, debido a su complejidad, diversas simplificaciones del relieve del terreno y de la catenaria que describen los cables, las cuales pueden repercutir

notablemente en la estimación de los valores de distancia a la línea y, por ende, en los valores de la intensidad de CM. Es habitual encontrar generalizaciones de la catenaria como un conductor rectilíneo indefinido cuando realmente a lo largo de los vanos que conforman el tendido eléctrico la altura de los conductores estará ligada a la curva catenaria que describen en cada uno de ellos, así como que se considere el terreno plano y horizontal, o sólo se evalúe el relieve a 50 metros a la línea, considerando que más allá de esta distancia los desniveles que pudiera haber no resultan significativos (Swanson, 2008; Tynes & Haldorsen, 1997). Otros investigadores han incorporado la topografía aplicando un factor de corrección a los valores del campo magnético obtenidos previamente a partir de un modelo sin elevación (Bessou et al., 2013) o han generado modelos 3D midiendo las distancias entre las viviendas y las líneas eléctricas mediante telémetros y Sistemas de Posicionamiento Global (GPS) (Vergara et al., 2015). La recopilación directa de datos de campo requiere una inversión de recursos y tiempo considerables.

Por otra parte, los programas informáticos de cálculo de CM basados en métodos 3D requieren formación específica para su manejo, tienen un coste económico elevado o su acceso se encuentra limitado por la empresa propietaria de las líneas eléctricas, haciendo que no siempre sean accesibles para la comunidad científica en general. Existen aplicaciones realizadas sobre estos programas que permiten una entrada de datos relativamente sencilla pero tampoco estas ofrecen salidas gráficas de los resultados de CM en forma de variable geográfica de manera que permitan una mejor interpretación y aporten un mayor conocimiento al poder observar y analizar su distribución territorial.

1.2. Objetivos y alcance

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son una herramienta común y con gran potencial en los estudios de salud ambiental que en la actualidad ofrecen no sólo importantes capacidades de modelado tridimensional (3D) de nuestro entorno, sino que además permite realizar análisis espaciales 3D entre los distintos elementos que lo componen y generar modelados de alta precisión de agentes contaminantes o factores físicos ambientales (Kirby et al., 2017). La obtención de mapas temáticos o sombreados por colores producidos con SIG son especialmente útiles para poner de manifiesto

disparidades en las variables geográficas relevantes y detectar potenciales fuentes de error. Las herramientas analíticas de los SIG permiten explorar de forma altamente eficiente diversos escenarios cuando se modifican los parámetros de entrada. Además, en la mayoría de los países desarrollados ya es posible acceder de forma gratuita a cartografía y datos geográficos de alta precisión para el modelado de cualquier zona de estudio.

El principal objetivo de esta tesis doctoral es generar íntegramente mediante un SIG 3D una superficie de valores de intensidad del campo magnético generado por una LEAAT en una zona residencial urbana que sea aplicable a estudios epidemiológicos de exposición residencial a CM. Se establece como hipótesis que a partir de modelos digitales del terreno (MDT) de alta precisión es posible modelizar tridimensionalmente tanto el terreno de la zona de estudio como la catenaria de las líneas eléctricas aéreas para obtener valores de distancias geométricas precisas entre la línea eléctrica y los puntos de cálculo del CM y, en consecuencia, superficies de valores precisos de intensidad del CM incluso en zonas con relieves geográficos complejos. La confiabilidad de las superficies generadas se validarán mediante una evaluación estadística a partir de muestras de valores de CM derivados las superficies obtenidas y calculados con datos reales de carga de las líneas facilitados por la empresa gestora de la red eléctrica y de muestras de valores de CM medidos directamente en la zona de estudio.

Algunos estudios previos han desarrollado aplicaciones interactivas integradas en entornos SIG que permiten calcular valores de campo utilizando ecuaciones tridimensionales (Turgeon et al., 1998) y modelar superficies de campos magnéticos utilizando generadores de malla de elementos finitos 3D a partir de los datos de entrada de la línea eléctrica (Joseph et al., 2018) aunque no incorporan datos de elevación del terreno

El modelo propuesto en este trabajo de investigación permite expresar los resultados del CM como un campo continuo de valores que no sólo permite obtener estimaciones de exposición a estos campos en cualquier punto del terreno a su cota real sino que también proporciona una herramienta fundamental para seguir algunas recomendaciones gubernamentales relacionadas con la exposición a CM. Concretamente, en la Resolución 2211 de la Asamblea Parlamentaria del Consejo de Europa de 2009, se

pide a los estados miembros que pongan a disposición del público mapas sobre la exposición electromagnética generada por LEAAT (PACE, 2009) y en la Resolución 1815 de la Asamblea Parlamentaria del Consejo de Europa de 2011 que donde se insta a la planificación urbana de distancias seguras desde las viviendas hasta las líneas eléctricas (PACE, 2011). También, el Consejo de Europa en su “Dictamen sobre los posibles efectos para la salud de la exposición a campos electromagnéticos” de 2015 (SCENIHR, 2015) establece entre las prioridades de investigación la comparación de ecosistemas terrestres antes y después de una nueva instalación de LEAAT y/o ubicados a diferentes intensidades de CM FEB.

Otros objetivos que se establecen dentro de esta tesis son:

- La comparación de diversos modelados 3D urbanísticos al objeto de conocer su afectación a la calidad de las superficies de CM generadas a partir de ellos.
- El análisis, utilizando estos modelados 3D, del error que se genera en la determinación de distancias entre los puntos de cálculo y las líneas eléctricas aplicando abstracciones habituales en grandes estudios epidemiológicos y realizar una representación territorial de dicho error.

1.3. Motivación

Esta tesis doctoral es una continuación de la tesis doctoral “Análisis territorial de la exposición electromagnética residencial producida por las líneas eléctricas aéreas de alta tensión” realizada dentro del Departamento de Expresión Gráfica, Diseño y Proyectos de la Universidad de Málaga por D. Manuel Marín Granados (Marín Granados, 2012). En ella, se desarrolla una metodología innovadora también basada en un SIG para analizar espacialmente las exposiciones a CEM de FEB en áreas residenciales. Su aportación principal es la obtención de mapas temáticos de intensidad del CM para diferentes cotas de elevación acordes a las diferentes alturas de plantas de los edificios, generando así una herramienta que permite detectar aquellas construcciones que por su altura constructiva se encuentran altamente expuestas. Los datos geométricos de las líneas son obtenidos a partir de estimaciones o promedios. Los resultados obtenidos son representados sobre escenarios 3D, si bien el relieve del suelo no es tenido en consideración. El método de

cálculo del CM adoptado tiene la ventaja de presentar relativa simplicidad (Kaune & Zaffanella, 1992) y además es integrado en el SIG.

En la actualidad, el avance de la tecnología para la adquisición de datos cartográficos y en particular, dentro de esta la basada en datos LIDAR (acrónimo del inglés LIDAR, Light Detection and Ranging o Laser Imaging Detection and Ranging) ha permitido generar de manera muy eficiente cartografía digital de alta precisión y el acceso a estos datos espaciales ha sufrido una importante transformación permitiendo su descarga gratuita en un número significativo de servidores nacionales de diversos países. Los modelos digitales del terreno constituyen uno de los productos que se han beneficiado en mayor medida de estos avances proporcionándoles una importante evolución en su precisión y, en España, es posible obtener MDT con resoluciones de 2 m y errores en los valores de elevación inferiores a los 10 cm en sus datos LIDAR de origen (Plan Nacional de Ortografía Aérea [PNOA], 2023).

Por otra parte, el modelado digital en 3D de LEAAT también se ha visto fuertemente impulsado por la alta disponibilidad de datos LIDAR y por el avance en las capacidades de representación gráfica y análisis espacial 3D de los Sistemas de Información Geográfica, haciendo de estos una herramienta capaz de satisfacer la demanda cada vez mayor de generar representaciones de nuestro entorno que incluyan todas sus dimensiones y elementos para obtener resultados lo más fieles posibles a la realidad. Entre las aplicaciones más destacables del cartografiado 3D se encuentran la visualización altamente realista de nuestro entorno aportando una mejor comprensión de este y facilitando la toma de decisiones en proyectos de diversos sectores como la planificación urbanística, la arquitectura o la ingeniería y, dentro de este último, es un ejemplo la gestión de infraestructuras de redes eléctricas (ESRI, 2023).

Por estos motivos, se consideró especialmente interesante y de gran potencial combinar estos avances para obtener y analizar nuevos modelados de CM de FEB en zonas residenciales urbanas que integraran la elevación del terreno, así como datos precisos de la geometría de las líneas eléctricas aéreas. La aplicación de estos nuevos recursos y tecnologías son una oportunidad para incorporar estos datos de manera muy eficaz y además obtener mapas de valores precisos de CM pudiendo satisfacer tanto los

requerimientos de análisis multivariantes en estudios epidemiológicos como de información pública mediante mapas informativos utilizando para ello un SIG, el cual constituye una herramienta de análisis espacial de uso general y multidisciplinar evitando así la necesidad de recurrir a programas específicos de cálculo del CM.

1.4. Estructura

Esta tesis doctoral se encuentra estructurada por capítulos. En los tres primeros que siguen a este de introducción se muestra el estado de conocimiento actual de las disciplinas en las que se fundamenta esta tesis doctoral, a saber, el cálculo del CM generado por LEAAT, el modelado 3D con SIG y las metodologías para la estimación de la exposición residencial a CM FEB. Estos han permitido establecer las bases de los dos estudios prácticos llevados a cabo y detallados en los dos capítulos que les siguen, que consisten en el análisis del error de la simplificación de distancias a LEAAT mediante un SIG 3D, y el modelado de superficies de CM en una zona residencial urbana también mediante un SIG 3D.

En el capítulo “Cálculo y mediciones del campo magnético generado por LEAAT” se explican las características propias de los campos magnéticos generados por líneas eléctricas y qué los diferencian de otros tipos de campos electromagnéticos. Para ello también se han revisado a nivel global los diferentes tipos de líneas eléctricas existentes actualmente y las tendencias de las redes eléctricas. Ello permite adquirir una idea general de las posibilidades de la población de verse expuesta a CM FEB. Se revisan también las técnicas de mitigación de estos campos mediante la modificación de diversos parámetros de la línea eléctrica y mediante la instalación de dispositivos de apantallamiento, con el objeto principal de conocer qué niveles máximos de reducción se están alcanzando y su viabilidad. Así mismo, se investigan los diferentes métodos de cálculo de CM existentes hasta la fecha destacando la precisión que son capaces de proporcionar para los valores de inducción magnética, así como sus limitaciones y aportaciones en el contexto de los estudios epidemiológicos. Concretamente se ha hecho énfasis, dado que una de las necesidades de esta tesis es modelar fielmente la catenaria trazada por la línea eléctrica, en las diversas conceptualizaciones de esta según diferentes métodos de cálculo y su afectación sobre los resultados de estos. Para concluir el capítulo, se proporciona una

visión general de las capacidades de salidas gráficas de los resultados obtenidos con los programas informáticos habituales de cálculo de CM.

En el tercer capítulo se abordan los modelos digitales de elevaciones (MDE) como elementos clave para el modelado 3D de nuestro entorno, prestando especial atención a la precisión, escala y nivel de detalle que actualmente pueden ofrecer en entornos urbanos. También se analiza el cartografiado digital de líneas eléctricas de alta tensión y su integración en SIG con el propósito principal de conocer la disponibilidad y representatividad de mapas de redes eléctricas en diferentes países, y se revisan las técnicas de modelado 3D de estas líneas en cuestiones de capacidad de representación y precisión de manera particular en entornos urbanos. En el último apartado se analizan las funcionalidades de los SIG 2D y 3D para el modelado de factores ambientales y dentro de ellas, la interpolación como herramienta clave para la generación de superficies predictoras de dichos factores, y se realiza una recopilación de publicaciones científicas sobre su modelado mediante SIG 3D.

En el cuarto capítulo se ha realizado un análisis exhaustivo de las metodologías para estimar la exposición residencial a CM FEB y qué aportaciones han realizado los SIG en esta disciplina. Previamente, para una mejor comprensión de dichas metodologías, de sus oportunidades y limitaciones, se ha definido el concepto de exposición residencial, las necesidades de cuantificar dicha exposición y las dificultades que conlleva, habiendo sido la caracterización de la exposición todo un desafío para la comunidad científica en las últimas décadas. De esta manera se han podido detectar necesidades a las que aportar posibles soluciones con los trabajos desarrollados en los capítulos siguientes, así como futuras líneas de investigación las cuales se detallan junto a las conclusiones en el capítulo final.

El quinto capítulo recoge un trabajo de investigación llevado a cabo en una zona residencial con urbanística, vegetación y orografía variable en la ciudad de Málaga (España). Mediante un SIG 3D se examina el error al simplificar las distancias reales entre el terreno y las líneas eléctricas aéreas según simplificaciones habituales encontradas en diversos estudios epidemiológicos de exposición residencial a CM. Los resultados son mostrados en mapas tridimensionales que representan el error porcentual

de dichas conceptualizaciones sobre la zona de estudio. De esta forma se aporta una herramienta que proporciona un mayor conocimiento de las posibles fuentes de error asociados a la elevación relativa entre el punto donde se quiere cuantificar la exposición y las LEAAT y, por tanto, un soporte significativo para una mejor planificación de las metodologías adoptadas en estudios epidemiológicos, así como una mejor interpretación de los resultados de estos estudios.

El sexto capítulo presenta un modelo para generar superficies de intensidad de campo magnético aplicable a estudios epidemiológicos de exposición residencial a CM FEB mediante un SIG 3D. Para ello se parten de modelos digitales del terreno de alta precisión, pero con diferentes resoluciones al objeto de comparar su efecto en la confiabilidad de las superficies modeladas. Para calcular el campo magnético se aplica la expansión en serie de la ley de Biot-Savart a un conductor rectilíneo infinito, pero con altura variable según la catenaria descrita por los cables. Así mismo se detalla el procedimiento de validación realizado en el que se utilizaron 69 puntos de control (1035 mediciones de campo) en una zona urbana libre y otros 28 puntos (420 mediciones de campo) en una zona urbana urbanizada con relieve complejo y el análisis estadístico de la incertidumbre de los diferentes modelados. Los resultados muestran un buen desempeño del modelo cuando se utilizan datos del terreno de alta resolución.

2. CÁLCULO Y MEDICIONES DEL CAMPO MAGNÉTICO GENERADO POR LEAAT

2.1. Descripción general de los campos electromagnéticos

La curiosidad y el interés por los campos electromagnéticos se remonta a la antigüedad, cuando el filósofo griego Tales de Mileto [624-546 a.C.] realizó las primeras observaciones conocidas sobre fenómenos eléctricos. En siglos posteriores, científicos de referencia como William Gilbert [1544-1603] o Galileo Galilei [1564-1642] continuaron investigando estos fenómenos, pero sus observaciones estuvieron limitadas a los efectos de los imanes. No sería hasta el año 1802 cuando el físico y químico danés Hans Christian Oersted [1777-1851] pudo demostrar que una corriente eléctrica que atraviesa un conductor genera un campo electromagnético en su entorno.

Se consideran como campos electromagnéticos (CEM), según el Real Decreto 299/2016, de 22 de julio de 2016, los campos estáticos (frecuencia 0 Hz) tanto eléctricos como magnéticos, así como los campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos variables en el tiempo, con frecuencias comprendidas entre 0 Hz y 300 GHz.

Los campos eléctricos estáticos (también conocidos como campos electrostáticos) se generan por cargas eléctricas fijas en el espacio. Cualquiera de estas cargas genera a su alrededor una fuerza sobre otra carga (campo) que dependerá de la distancia que las separe. Un ejemplo es el campo eléctrico ocasionado por los electrodomésticos que están enchufados cuando estos están apagados y, a mayor voltaje del aparato, mayor será este campo.

La existencia de un campo magnético generado por cargas requiere que estas estén en movimiento. Si este movimiento es constante en una dirección (corriente continua) entonces, además de un campo eléctrico se genera un campo magnético estático. A nuestro alrededor, se producen campos electromagnéticos estáticos en cualquier aparato que funcione con batería: coches, linternas, ordenadores portátiles, etc. Otros ejemplos son los trenes de levitación magnética o los dispositivos de resonancia magnética para pruebas médicas radiológicas. El campo magnético estático se caracteriza por ser

constante en el tiempo, por disminuir rápidamente con la distancia a la corriente que lo genera y será mayor cuanto mayor sea esta intensidad de corriente eléctrica.

Un campo magnético puede ser originado también, por la existencia de campos eléctricos variables en el tiempo. En situaciones estáticas o de corrientes continuas, la electricidad y el magnetismo son fenómenos distintos. Sin embargo, cuando la corriente va cambiando de sentido (corriente alterna) se produce un acoplamiento de los campos eléctricos y magnéticos que será mayor a mayor cambios de sentido por segundo, esto es, a mayor frecuencia (Hz). Esta interrelación de los campos es debida a dos fenómenos: la inducción magnética (Ley de Faraday) y las teorías sobre las corrientes de desplazamiento de Maxwell. Faraday determinó que un campo magnético variable en el tiempo que se induce en un circuito cerrado ocasiona una diferencia de potencial o fuerza electromotriz que a su vez generará una corriente eléctrica, y, por ende, un campo eléctrico; las teorías sobre las corrientes de desplazamiento indican que un campo eléctrico variable en el tiempo induce necesariamente un campo magnético. Por tanto, una corriente alterna generará una repetida sucesión oscilante en el espacio de campos magnéticos y eléctricos que perturban el espacio como una combinación de ondas eléctricas y magnéticas que se desplazan simultáneamente a la velocidad de la luz (en el aire, $c= 299705543$ m/s) y que constituyen la radiación electromagnética.

La energía que transportan las ondas electromagnéticas es proporcional a su frecuencia y cuando alcanzan valores muy altos, estas ondas tienen la propiedad de romper los enlaces químicos de las moléculas de los elementos que están a su alrededor y generar iones. Por ello se conocen como “radiaciones ionizantes” y pueden dañar el ADN de las células derivando en mutaciones genéticas que causen cáncer u otros efectos perjudiciales para la salud. Son algunos ejemplos los rayos gamma emitidos por materiales radioactivos, los rayos X, así como la radiación para tratamientos terapéuticos utilizados en el campo de la medicina (ver Figura 2.1).

Para frecuencias de onda más bajas, la energía de los cuantos de luz que transportan las ondas electromagnéticas no tiene la capacidad de arrancar electrones a la materia, y, por lo tanto, no puede causar daños en el ADN. Sin embargo, pueden generar

una excitación electrónica que cause un calentamiento de los tejidos o materiales. Estas radiaciones reciben el nombre de “radiaciones no ionizantes”.

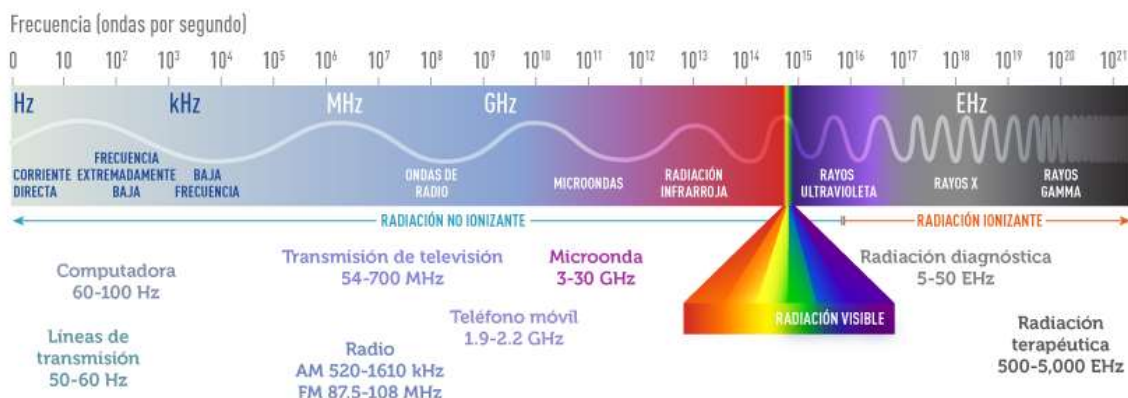


Figura 2. 1. Representación del espectro electromagnético. Fuente: Instituto Nacional del Cáncer, 2018

Dentro de este espectro de radiaciones, la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2023) clasifica los campos electromagnéticos en tres grandes grupos:

1. Campos electromagnéticos de frecuencia extremadamente baja (FEB) con frecuencias generalmente de hasta 300 Hz, siendo las principales fuentes de estos campos las instalaciones destinadas a la generación, transporte y distribución de energía eléctrica a frecuencia industrial (50 Hz, 60 Hz en los Estados Unidos) como líneas aéreas eléctricas de alta y media tensión, centros transformadores y una gran variedad de aparatos electrodomésticos.
2. Campos de frecuencia intermedia (FI), con frecuencias de 300 Hz a 10 MHz. Son generados por las pantallas de ordenador, por dispositivos antirrobo y otros sistemas de seguridad.
3. Campos de radiofrecuencia (RF), con frecuencias de 10 MHz a 300 GHz, como las ondas de radio, televisión y telefonía móvil, así como sus terminales inalámbricos, (teléfonos móviles como los dispositivos domiciliarios Wi-Fi, bluetooth, etc.). Un ejemplo muy utilizado por su capacidad de calentamiento son los hornos de cocina por microondas.

En las frecuencias altas los campos eléctricos y magnéticos se encuentran

estrechamente acoplados y pueden considerarse dos componentes de una misma onda electromagnética (radiación). La distancia entre dos ciclos de ondas consecutivas (longitud de onda) es muy pequeña respecto a los objetos o personas situados en su entorno más próximo, por lo que la radiación se vuelve importante. En frecuencias extremadamente bajas, las longitudes de ondas son muy grandes en comparación con los objetos de interés (5000 km a 50 Hz), por lo que no se produce una irradiación significativa de los campos eléctricos y magnéticos porque estos no se propagan de forma interrelacionada. Por tanto, en esta situación de campo cercano (menos de una longitud de onda) los campos magnéticos y eléctricos pueden considerarse desacoplados, como si provinieran de fuentes diferentes (campos cuasi estacionarios). Bajo estas condiciones es posible medirlos por separado, por lo que se describen en términos de la intensidad de campo eléctrico (E) y para el campo magnético, de inducción magnética (H) o densidad de flujo magnético (B).

La intensidad de campo eléctrico es una magnitud vectorial \vec{E} que representa la fuerza ejercida sobre una partícula cargada y es independiente de la situación de movimiento de esta partícula en el espacio. Esta fuerza se mide como una diferencia de potencial a lo largo de una unidad de distancia, por lo que se expresa en voltios por metros (V/m).

La magnitud del campo magnético también es de carácter vectorial y puede describirse en cualquier punto del espacio tanto por la intensidad del campo magnético \vec{H} como por la inducción magnética \vec{B} :

- Campo \vec{H} , Excitación Magnética o Intensidad Magnetizante describe la intensidad del campo magnético en la región que afecta. Hace referencia al campo magnético en función de las causas que lo provocan (corriente y variaciones del campo eléctrico) pero es independiente de las características del medio. Se aplica con mayor frecuencia en estudios biológicos y se expresa en amperios por metro (A/m).
- Campo \vec{B} , Inducción Magnética, Densidad de Flujo Magnético o Vector de Inducción Magnética es la cantidad de líneas de fuerza magnética por unidad de

área en el espacio afectado y expresa el efecto del campo magnético (fuerzas sobre las cargas). En el Sistema Internacional se mide en teslas (T) y en el Sistema Cegesimal, en Gauss (G), si bien la estimación de exposiciones ambientales se expresa en micro teslas (μT) o mili gauss (mG).

La distinción entre las magnitudes B y H que describen el campo magnético cobra importancia cuando estos campos atraviesan materiales, especialmente en aquellos que tienen propiedades ferromagnéticas. En un espacio libre donde no existe ningún medio material (vacío) y en materiales biológicos, estas propiedades se encuentran ausentes y por tanto ambas magnitudes se encuentran directamente relacionadas mediante la expresión:

$$B = \mu H$$

Siendo μ el coeficiente de permeabilidad magnética que en el vacío adquiere el valor de $4\pi 10^{-7}$ (Tm/A). Por consiguiente, se pueden intercambiar utilizando las equivalencias:

$$1\text{A/m}=4\pi 10^{-7}\text{T}$$

$$1\mu\text{T}=10\text{mG}=0,8\text{ A/m.}$$

Una característica particular de las líneas de campo magnético es que son siempre perpendiculares al conductor rectilíneo que transporta la corriente que lo genera y que al contrario que ocurre con los campos eléctricos, los campos magnéticos no se apantallan por la presencia de vegetación o construcciones.

En esta tesis doctoral, el término de campo magnético (CM) hace referencia a la inducción magnética B .

2.2. Campos magnéticos generados por LEAAT

2.2.1. Redes eléctricas de transmisión y distribución: características generales y estado actual global

El suministro eléctrico final en cualquier entorno doméstico, laboral o industrial requiere de tres procesos previos que son: la generación de la energía eléctrica, su transporte y su distribución. Cuando la electricidad es generada en las centrales eléctricas, ya sea mediante combustibles fósiles, ciclos combinados, energía nuclear o energías renovables, es transportada por líneas eléctricas de alta tensión hasta los centros de carga y las subestaciones eléctricas, donde se modifican diferentes parámetros de la línea (tensión, número de fases, conexiones entre circuitos, etc.) según las necesidades (Figura 2.2).

Debido a limitaciones ambientales, las centrales generadoras y estas subestaciones suelen estar distanciadas varios cientos de kilómetros entre sí, así como estas de los núcleos urbanos. Para poder reducir al máximo tanto las pérdidas de energía debidas al efecto Joule durante su transporte, como la cantidad de conductores necesarios, se eleva su nivel de tensión. De esta manera se disminuye la intensidad que circula por la línea y, por tanto, se reducen las pérdidas por calentamiento de los conductores y por otros efectos electromagnéticos. Esta reducción de la intensidad también permite una reducción de la sección de cable necesario para transportar la misma potencia y, por tanto, del peso del cable por unidad de longitud. Por consiguiente, un elevado voltaje permite maximizar la eficiencia de la red eléctrica.

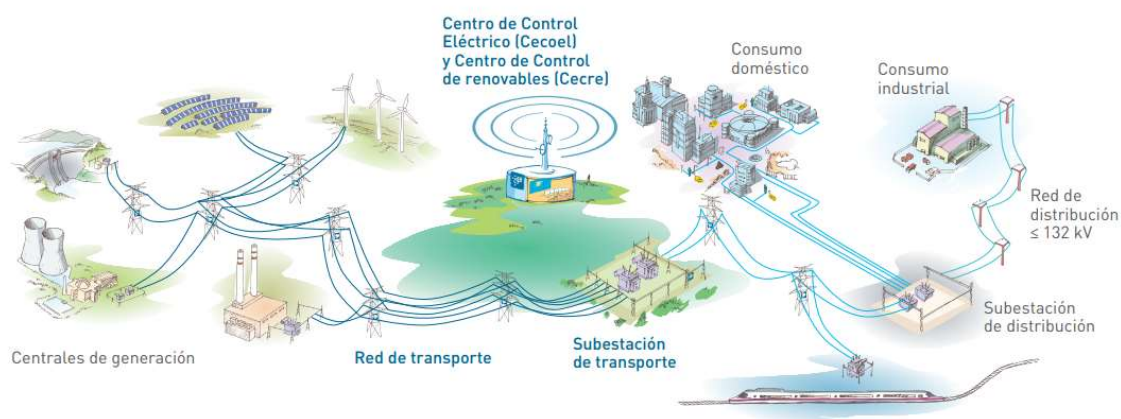


Figura 2. 2. Esquema básico del sistema eléctrico. Fuente: Red Eléctrica Española, 2023

El voltaje de funcionamiento de las redes las clasifica de forma general en líneas de alta o baja tensión. A nivel internacional, no hay definido un valor límite concreto entre la alta y la baja tensión, si bien la Comisión Electrónica Internacional hace referencia, aunque de forma indirecta, a los límites para la corriente alterna de 1 kV y para la corriente continua de 1.5 kV.

En América del Norte, las líneas de transmisión trabajan con voltajes que varían desde aproximadamente los 115 kV a 765 kV, mientras que otros países utilizan diferentes voltajes estándar de aproximadamente 100 kV a 400 kV. En la Tabla 2.1 se recogen los voltajes de transmisión que se pueden encontrar en diferentes países:

País	Alta tensión (kV)	Extra Alta Tensión (kV)	Ultra Alta Tensión (kV)	Alta Tensión Corriente Continua (kV)
Brasil	138, 230	345, 440, 500, 750	1000, 1500	1000
Canadá	115, 230	345, 500, 735	1200, 1500	1200
China	220	500	1000	800
India	132, 220	400, 763	1200	800
Japón	110, 132, 154 187, 220, 275	500	1000	650
Rusia	110, 154, 220	330, 400, 750	1200	750
R. U.	110, 132, 275	400	-	500
EE. UU.	115, 138, 230	345, 500, 765	1200	800

Tabla 2. 1. Potencias habituales de trabajo de redes eléctricas en diferentes países. Fuente: adaptado de Kalt et al., 2021

A nivel global, la mayoría de las redes de transporte y distribución de energía trabajan con corriente alterna debido a que permiten una mejor regulación de los voltajes y por tanto una mayor eficiencia de la transmisión. No obstante, esta eficiencia requiere un incremento del potencial que no puede hacerse de forma ilimitada, pues conlleva un incremento de costes por la necesidad de implementar más aisladores y aumentar la altura de las torres y el ancho de cruceta en aras de evitar arcos eléctricos entre los diferentes cables. Aunque actualmente existen en funcionamiento redes de extra alto voltaje y ultra alto voltaje, también se están implementando redes de transmisión con corriente continua,

que pueden resultar más económicas en el transporte de electricidad a largas distancias al no requerir de estaciones transformadoras (Colin Bayliss & Brian Hardy, 2011) y que pueden ser una solución para el previsible incremento actual de la demanda energética en el mundo (Kishore & Singal, 2014) dentro del marco de la transición energética para el cumplimiento de las directrices medioambientales (Kalair et al., 2016). Actualmente la corriente continua de alto voltaje se utiliza sólo para transmisiones a muy largas distancias y en redes submarinas.

Respecto a la frecuencia, en Europa y la mayoría de los países es de 50Hz, excepto en los Estados Unidos, Canadá y algunas zonas de Japón donde es de 60 Hz. En cualquier caso, siempre se encuentran en el campo de frecuencias extremadamente bajas o también denominada frecuencia industrial (50-60 Hz).

La red de transmisión y distribución de electricidad utiliza un sistema trifásico, esto es, tres corrientes alternas monofásicas con igual valor eficaz (frecuencia y amplitud). Cada corriente monofásica (fase) se encuentra desplazada 120° respecto a la otra. Si en las tres fases las corrientes circulantes tienen el mismo valor y el desfase es simétrico se dice que la línea eléctrica está equilibrada. Cuando no se cumple alguna de estas condiciones, entonces la línea está desequilibrada o desbalanceada. La red trifásica es más ventajosa económicamente para los operadores de red ya que su instalación requiere conductores de menor sección que para una red monofásica equivalente, además de proporcionar un mayor rendimiento a los usuarios industriales porque la mayoría de la maquinaria industrial funciona con motores trifásicos. Técnicamente, las redes de distribución no son diferentes de las de transmisión, solamente soportan redes con cargas y voltajes más bajos.

Las redes eléctricas pueden ejecutarse de forma aérea o subterránea. Las líneas aéreas de transmisión están formadas por cables desnudos, normalmente de aluminio, suspendidos entre apoyos, habitualmente torres de celosía metálicas en alta tensión y postes de madera u otras estructuras simples para redes de distribución más secundarias. Este método es más eficiente desde el punto de vista económico tanto de la instalación como de su mantenimiento y gestión del voltaje que los sistemas subterráneos (Adam et

al., 1984; IEEE, 2013). Cuando no es posible su instalación por problemas técnicos, ambientales o de seguridad se recurren a líneas de transmisión subterráneas.

En el proceso de distribución también suelen predominar las líneas eléctricas aéreas si bien la presencia de redes subterráneas suele ser más habitual dado que en esta etapa se lleva la electricidad desde las subestaciones a los usuarios finales por lo que debe penetrar en núcleos urbanos de gran densidad. No obstante, la red subterránea de alta tensión suele ser un porcentaje muy bajo de la red total, por ejemplo, en Inglaterra y Gales supone sólo un 4% (National Grid UK, 2023). Debido al elevado desarrollo urbanístico de las ciudades de las últimas décadas, estas se han ido expandiendo e invadiendo zonas donde inicialmente se encontraban redes eléctricas y subestaciones alejadas de la población. Un ejemplo es la ciudad de Málaga (España) donde es frecuente encontrar líneas de alta y baja tensión atravesando zonas urbanas consolidadas (Figura 2.3).



Figura 2. 3. Línea eléctrica de alta tensión en Málaga. Fuente: Jiménez, 2023

Un estudio llevado a cabo en el año 2021 (Kalt et al., 2021) estimó que en el mundo hay 4.7 millones de kilómetros de redes de transmisión (considerando como tales todas las líneas aéreas y subterráneas con un voltaje superior a 100 kV), y entre 88 y 104 millones de kilómetros de redes de distribución, en las que se incluyeron todas las demás,

encontrándose la mayor concentración de redes eléctricas en China con un 28% del total de la red de transmisión mundial, seguida de EE. UU. y Europa con longitudes similares de líneas de transmisión. Estos kilometrajes hacen referencia a longitudes de circuito y no al trazado de la línea, por lo que en líneas trifásicas de doble circuito se computaron por 6 las distancias recorridas y así en cada caso. En la Figura 2.4 se muestran los kilómetros de líneas de transmisión y distribución en diferentes regiones del mundo.

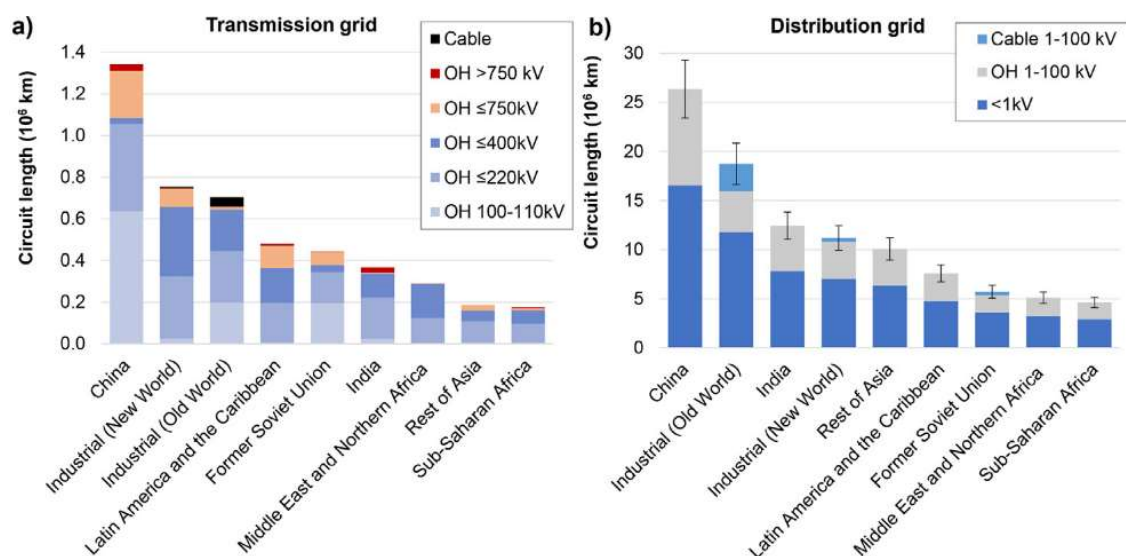


Figura 2. 4. Longitudes de circuitos de líneas eléctricas en varios países. Fuente: Kalt et al., 2021

En esa misma investigación también se concluyó una densidad media global de circuitos para las redes de transmisión y distribución de 0.67 km/km². Las mayores densidades de líneas eléctricas, entendiéndose esta como longitud en km de circuitos por km² de superficie del país correspondió a Singapur con 3.16 km/km², siendo también algunos países de Europa destacables por sus altas concentraciones de líneas, como Alemania y Reino Unido, donde las medias oscilaron entre 2.5 y 6 km/km². Otros países también destacables fueron China e India.

En el año 2011, el sistema de transmisión y distribución (red principal) en el Reino Unido estaba formado por 11643 km de líneas de 400kV, 5766 km de líneas de 275 kV, 5234 km de 132 kV de los que 7000 km corresponden únicamente a líneas de transmisión (National Grid UK, 2023). En un estudio llevado a cabo en Francia, se recoge que en año

2010 disponían en este país de 13381 km de líneas de 440 kV, 21226 km de 220 kV, 1037 km de 150 kV y 45500 km de 63/90 kV de líneas eléctricas aéreas (Bessou et al., 2013), que representan un 81% del total de su red nacional, correspondiendo las restantes instalaciones a trazados subterráneos.

En España, la red eléctrica está formada por aproximadamente 28369 km de red según datos de la Red Eléctrica de España (REE), de los que el 97% de los kilómetros instalados corresponde a líneas superiores de 220 kV.

2.2.2. Definición de LEAAT

2.2.2.1. Características principales

La definición de líneas eléctricas en España se recoge en el Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en líneas eléctricas de alta tensión (Real Decreto 223/2008), entendiéndose como tales:

“aquellas de corriente alterna trifásica de 50 Hz de frecuencia, cuya tensión nominal eficaz entre fases sea superior a un kilovoltio”

En la práctica es habitual que las compañías eléctricas las denominen atendiendo a la siguiente clasificación:

- Instalaciones de transporte (categoría especial): formada por líneas de alta tensión mayor o igual a 220 kV. Las tensiones normalizadas son de 220 kV y 400 kV. También se incluyen líneas de menor tensión que formen parte de la red de transporte, como, por ejemplo, líneas de 66 kV en zonas insulares.
- Red de Distribución de alta tensión (primera y segunda categoría): comprende líneas con tensiones entre 220 kV y 30 kV, siendo las tensiones normalizadas de 45 kV, 66 kV, 110 kV, 132 kV y 150 kV,
- Red de Distribución de media tensión (tercera categoría): formada por las líneas eléctricas con voltajes inferiores a 30 kV y superiores a 1 kV, que se utilizan para la distribución y el suministro de la energía en zonas residenciales e industriales.

Le corresponden las tensiones normalizadas de 3 kV, 6 kV, 10 kV, 15 kV, 20 kV, 25 kV y 30 kV.

En relación con el cableado de una línea eléctrica aérea esta se caracteriza según la norma UNE 31302-466: 1991 (AENOR, 1991) por:

- Número de circuitos por apoyo. Es posible diferenciar entre líneas de simple circuito (imágenes superiores de la Figura 2.5), de doble circuito (imágenes inferiores de la Figura 2.5) o de múltiples circuitos.

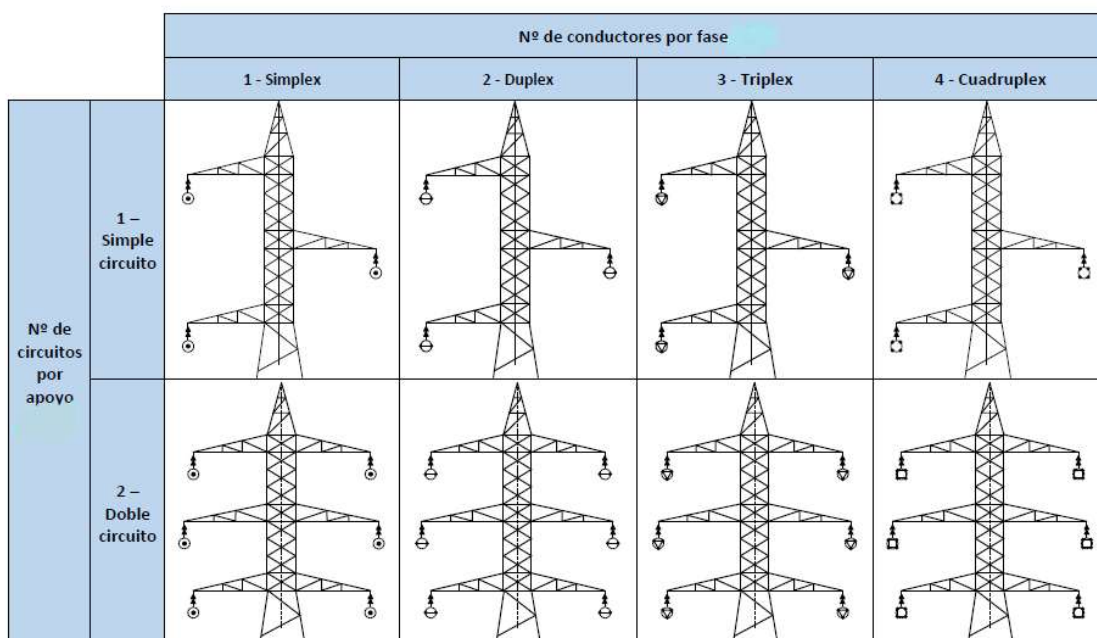


Figura 2. 5. Líneas de simple y doble circuito con conductores simplex, doble, triple y cuádruple. Fuente: Vidal Blanco, 2017

- Número de conductores por fase: algunos ejemplos son un conductor (simple), dos conductores (doble), tres conductores (triple) o cuatro conductores (cuádruple). Normalmente las líneas en las que el número de conductores por fases es de dos, la línea es de 220 kV y si está formada por cuatro, será de 400 kV. En la Figura 2.5 también aparecen reproducidas las combinaciones más usuales de líneas de simple y doble circuito con diferente número de conductores por fase.
- Configuración de las fases. Según la disposición geométrica de estas respecto a los apoyos se puede diferenciar entre configuración en capa (todas en el mismo

plano horizontal), en capa bóveda (la fase central está a diferente cota que las otras), en triángulo, delta (si el triángulo es isósceles), en bandera (las fases están alineadas en un eje vertical), semi vertical (si la fase central está alejada respecto las otras dos) y en doble bandera o en hexágono para líneas de doble circuito.

- Distancia entre fases o separaciones horizontales y verticales entre cada una de ellas, dependiendo de si son líneas de un solo circuito o varios.
- Transposición de las fases, que consiste en el cambio de la posición relativa de las fases de un circuito que tiene como finalidad establecer una simetría eléctrica de los conductores ya sea respecto a ellos mismos, a tierra o a otros circuitos próximos. En una línea de doble circuito, cuando las fases no se encuentran transpuestas (imagen izquierda de la Figura 2.6) los conductores de fase se encuentran ordenados de forma simétrica respecto a un plano vertical de simetría.

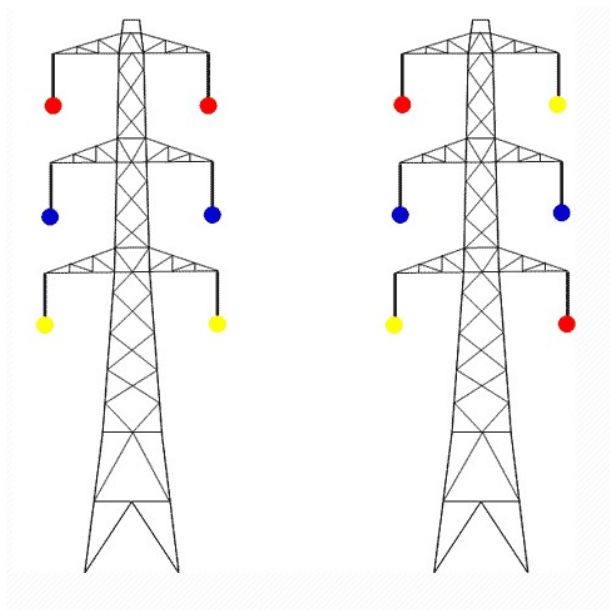


Figura 2. 6. Esquema de transposición de fases. Fuente: EMF.info, 2023

Cuando una línea eléctrica tiene sus fases ordenadas de forma transpuesta (imagen derecha de la Figura 2.6), en cualquiera de sus posibles formas, al menos dos de los conductores de fases pierden esta simetría central alternando su posición en el otro lado de la cruceta. En algunos países se tiende a no transponer las fases para facilitar el trabajo

de los operarios de mantenimiento o simplemente no es común realizar esta transposición, como en los EE. UU., si bien en otros, como el Reino Unido, la mayoría de la red sí se encuentra transpuesta (EMF.info, 2023).

Las técnicas más utilizadas para mejorar la eficiencia de las líneas de transmisión en cuanto a su capacidad de transferencia de energía, además del aumento del voltaje, consisten en incrementar el número de conductores por fases, aumentar el límite térmico de los conductores, así como reducir la distancia entre fases (compactación de la línea) y la carga de alta impedancia de sobretensión. Estas dos últimas técnicas resultan destacables por su viabilidad económica, ya que se basan en una reordenación los conductores y un replanteo de su disposición geométrica (Moura et al., 2022).

Otros parámetros característicos de las líneas eléctricas de alta tensión son los inherentes a la catenaria que describen los cables, los cuales se tratan con mayor detalle en el apartado siguiente.

2.2.2.2. *Definición de la catenaria descrita por una LEAAT*

Los cables entre dos apoyos consecutivos de una línea eléctrica son elementos estructurales cuya sección transversal es muy pequeña en relación con su longitud y por tanto puede considerarse despreciable. Otra característica inherente a la definición mecánica de cable es que este no se encuentra sometido a esfuerzos de flexión ni cortadura y tan sólo resiste esfuerzos axiales. Cuando un cable se deforma según el estado de cargas al que se encuentra sometido, el cable se comporta como un sólido rígido y cumple con las ecuaciones de equilibrio. La ecuación de equilibrio (1) determinada para una un cable sometido a un estado de cargas únicamente atribuible a su propio peso, como el correspondiente a los cables de una LEAAT anclado por sus extremos a los apoyos, se denomina catenaria y viene dada por:

$$y = c \cosh \frac{x}{c} = c \frac{e^{\frac{x}{c}} + e^{-\frac{x}{c}}}{2} \quad \text{donde} \quad c = \frac{T}{p} \quad (1)$$

siendo c (m) la constante de la curva que expresa la relación entre la componente horizontal mecánica de la tensión T (kg) y entre el peso por unidad de longitud del cable (kg/m); x (m) es la abscisa según un sistema de ejes cartesianos local de la catenaria que

pasarán por su vértice. Este vértice puede estar ubicado en el interior del vano o no y se encontrará a la distancia c (m) del eje de ordenadas.

Para obtener la abscisa x de cualquier punto sería necesario conocer previamente la del punto medio (X) del vano al que pertenece según la expresión (2):

$$X = cA \sinh z = c \ln(z + \sqrt{z^2 + 1}) \quad \text{donde} \quad \sinh \frac{X}{c} = \frac{d}{2c \sinh \frac{a}{2c}} = z \quad (2)$$

En la que a (m) es la longitud del vano y d (m) su desnivel.

Así, por ejemplo, la abscisa del apoyo inicial (x_1, y_1) o del apoyo final (x_2, y_2) de ese vano serían (3):

$$x_1 = X - a/2 \quad ; \quad x_2 = X + a/2 \quad (3)$$

En cualquier caso, el punto más bajo de la curva corresponde a la posición de la flecha máxima (Figura 2.7), siendo esta la distancia entre la línea recta que pasa por los puntos de sujeción del cable en cada apoyo y el punto más bajo de la curva. La determinación de la flecha máxima viene condicionada por la separación mínima de los cables sobre el suelo exigida por normativa, así como por los diferentes esfuerzos a los que se verán sometidos. Estos esfuerzos serán atribuibles al propio peso de los conductores, así como a las sobrecargas por viento y nieve.

No obstante, cuanto más pequeña es la luz del vano, la similitud de la catenaria con una parábola es mayor. De hecho, es habitual en cálculos de líneas eléctricas recurrir a las ecuaciones de la parábola en vanos con poca flecha. En concreto, esta similitud es posible aceptarla para relaciones entre valores de luz y flecha comprendidos entre (Piqueras Yepes, 2022):

$$\frac{1}{20} \leq \frac{\text{flecha}}{\text{luz}} \leq \frac{1}{5}$$

La sustitución de la catenaria por una parábola también introduce errores importante en el cálculo de las flechas cuando los vanos son largos, y más aún si estos presentan desniveles entre los apoyos (Moreno Clemente, 2004).

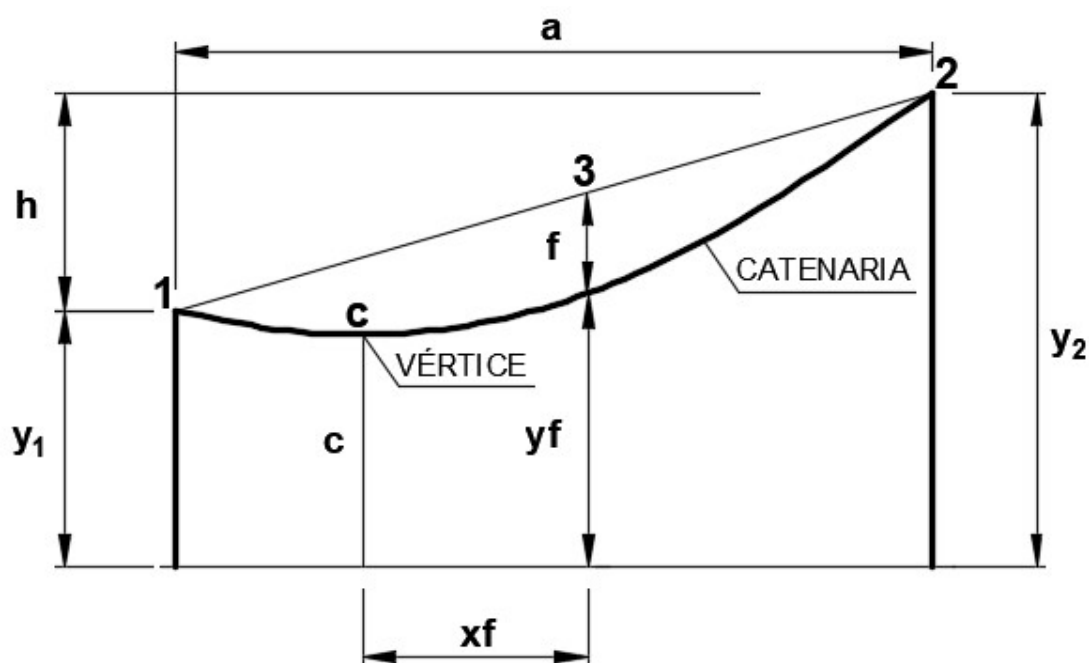


Figura 2. 7. Esquema de catenaria. Fuente: adaptado de Moreno Clemente, 2004

2.2.3. Características particulares de los CM generados por LEAAT

2.2.3.1. Dirección del CM generado por una LEAAT

Las LEAAT transportan corrientes eléctricas a través de sus conductores de fase por lo que son una fuente de campos magnéticos (EPRI, 2005). Como se vio en el apartado anterior, cualquier cable suspendido experimenta en mayor o menor grado, un hundimiento debido a su propio peso. Esto da lugar a que, además de las líneas de campo perpendiculares al cable, tal y como ocurre en un conductor completamente rectilíneo, también exista una componente axial del CM en la dirección del cable. No obstante, esta suele ser mínima respecto al campo total por lo que en la práctica puede considerarse que el CM se produce únicamente en el plano perpendicular a la línea eléctrica.

Otra particularidad de los campos generados por líneas eléctricas aéreas es su polarización. La polarización puede describirse como la figura geométrica descrita al transcurrir el tiempo por el extremo del vector de campo electromagnético situado en un punto fijo del espacio, encontrándose dicha figura en un plano perpendicular a la dirección de propagación de la onda. Mientras que el CM generado por un único conductor está polarizado linealmente y el vector del CM en cualquier punto del espacio

oscila únicamente hacia delante y hacia atrás, en un circuito trifásico el vector de campo magnético traza una elipse. Sin embargo, este campo dipolar tiende a convertirse en circular a distancias suficientemente alejadas de la línea. En la imagen inferior (Figura 2.8) se muestra esta variación en función de la distancia a la línea eléctrica aérea de un solo circuito con una configuración tipo “delta” de las fases, encontrándose el cable más bajo a una distancia de 12 metros sobre el suelo. Se aprecia que a partir de los 50 m el campo magnético se encuentra perfectamente polarizado circularmente.

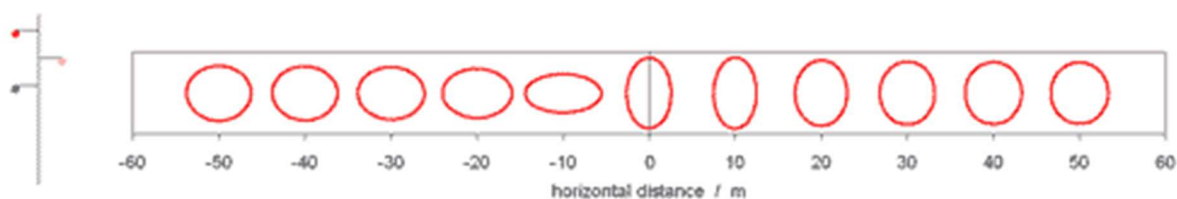


Figura 2. 8. Polarización del campo magnético para una línea eléctrica con configuración tipo delta. Fuente: EMFs.info, 2023

En caso de un circuito doble trifásico en el que las fases relativas se encuentran transpuestas, el campo magnético se convierte en un cuadrupolo, lo que genera una polarización elíptica significativa. Si además las corrientes no se encuentran equilibradas tal y como es habitual en la práctica, este cuadrupolo no será simétrico. Por lo que predecir la dirección exacta de los CM en este tipo de líneas es imposible si no se conocen datos precisos de las corrientes de la línea. No obstante, sí se conoce que esa dirección del campo magnético se encuentra en un plano transversal a la línea eléctrica y que se encuentra polarizado elípticamente de forma significativa, y que para definir el valor total del campo se toma la media cuadrática de las componentes del vector de inducción magnética (EMFs.info, 2023).

2.2.3.2. Variables que afectan al CM

El diseño de líneas eléctricas requiere un enfoque multiobjetivo que integre la consideración de factores eléctricos, mecánicos, operativos y económicos. No sólo debe cumplir las condiciones de funcionamiento requeridas, sino que también deben limitarse los campos magnéticos generados. Estos CM pueden inducir voltajes en instalaciones cercanas, como gaseoductos u otros tipos de tuberías metálicas, causando la corrosión de sus paredes lo que puede desencadenar en riesgo de fugas de materiales peligrosos (Gouda

et al., 2021). Además, estos campos se encuentran regulados mediante las restricciones legislativas de cada país con relación a la exposición de las personas a CM al objeto de garantizar su salud. Los parámetros geométricos y eléctricos de una LEAAT que van a afectar al CM que genera son:

- **Separación de los cables.** Una separación mayor entre conductores de distintas fases incrementa el campo magnético (Kaune & Zaffanella, 1992). Esta distancia entre los cables debe garantizar que no se produzcan arcos eléctricos, por lo que para voltajes mayores esta separación también lo será y, por ende, el CM.
- **Configuración de las fases.** En líneas de un solo circuito, la disposición delta genera un campo magnético menor. Si además está invertida, la reducción se optimiza aún más. En la imagen inferior (Figura 2.9) se muestra el resultado de una comparación de los valores de CM para distintas configuraciones en una línea de simple circuito trifásica de 400 kV por la que circula una corriente de 1000 A.

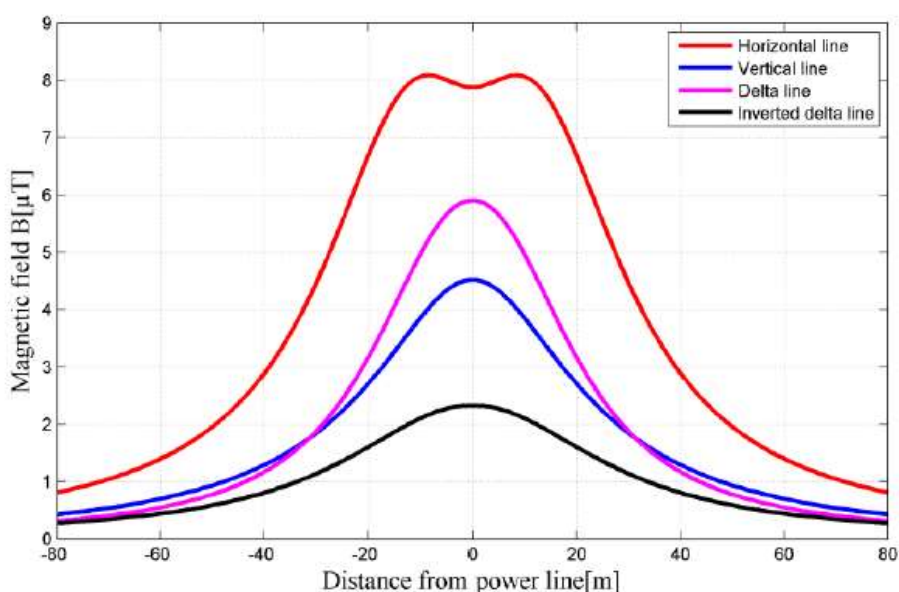


Figura 2. 9. Niveles de campo magnético según diferentes configuraciones de fases de una línea de circuito simple. Fuente: Sid Ahmed et al., 2022

En dicho estudio comparativo (Sid Ahmed et al., 2022) sobre cuatro posibles configuraciones (horizontal, vertical, delta y delta invertida), se obtuvo que la configuración delta invertida fue la que generó menos valores de CM,

mientras que la configuración horizontal, por tener todos los conductores situados más próximos al suelo fue la configuración que generó mayores valores de CM en toda la línea eléctrica.

Otras transposiciones de fases en líneas de doble circuito que han sido investigadas (Kostyszyn & Miśków, 2022) son para una configuración en triángulo, obteniendo que una disposición de las fases según Figura 2.10.

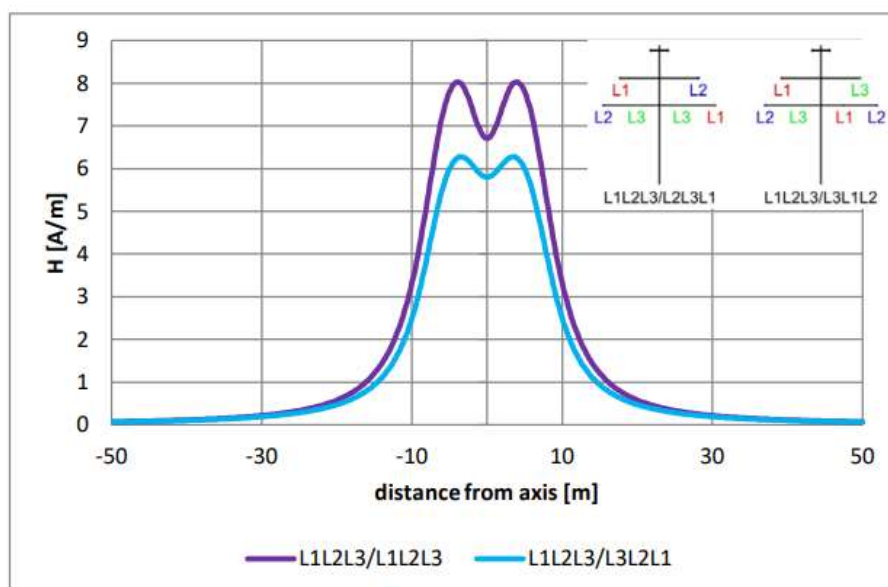


Figura 2. 10. Niveles de campo magnético para configuraciones en triángulo de una línea de doble circuito. Fuente: Kostyszyn & Miśków, 2022

En líneas de doble circuito, cuando las fases no están transpuestas, por ejemplo, en una configuración superhaz (abc-abc, donde a, b y c representan las fases de cada circuito), los campos generados por cada conductor se suman porque tienen la misma dirección, por lo que el campo resultante es mayor. En cambio, cuando las fases se encuentran transpuestas, por ejemplo, según el ordenamiento de baja reactancia abc-cba, los campos de las fases a-c se cancelan parcialmente por tener direcciones opuestas, generando campos hasta tres veces menores que con la configuración anterior (Cruz-Romero, 2000). Esto es debido a que, en el primer caso, el campo decrece con el cuadrado de la distancia al punto donde se mide mientras que, con una transposición según la segunda configuración, los

campos disminuyen con el cubo de dicha distancia. Es importante destacar que, en los puntos ubicados directamente bajo los cables de la línea, el CM será independiente de la configuración de las fases.

- **División de fases.** El número de subconductores en cada haz de fase también influye en los niveles de CM. Se ha comprobado (Bravo-Rodríguez et al., 2019) que la utilización de cuadrupolos en lugar de dipolos genera una reducción del CM, tal y como se observa en la imagen inferior (Figura 2.11).

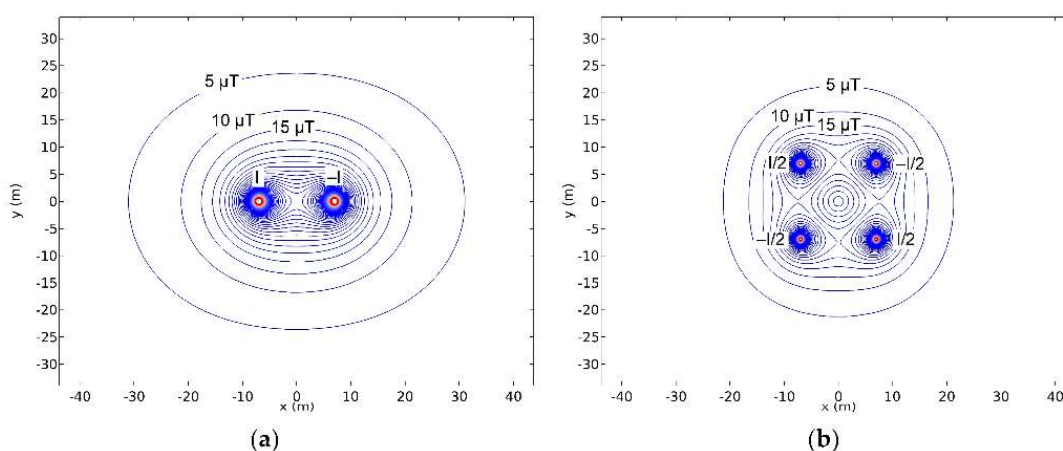


Figura 2. 11. Niveles de campo magnético para división de fase en dipolo (a) o cuadrupolo (b). Fuente: Bravo-Rodríguez et al., 2019

- **Intensidad de la corriente.** Aunque el CM no depende del voltaje de manera directa, las líneas con voltajes más altos suelen transportar mayores intensidades de corrientes y por tanto los CM generados son mayores. No obstante, no suele ser habitual que las líneas de distribución más cercanas a los puntos de suministro trabajen al máximo de su capacidad. Normalmente la intensidad portada está entre un 10% y un 30% por debajo de la máxima permitida (Kostyszyn & Miśków, 2022), por lo que los campos suelen ser menores que los teóricamente esperados para esas líneas. En la imagen izquierda de la Figura 2.12 se muestra la comparación de los campos magnéticos generados por varias líneas aéreas de alta tensión de voltajes típicos del Reino Unido, mientras que en la de la derecha puede verse para una misma línea de 12 kV, los valores de CM obtenidos según diferentes valores de intensidad circulante.

El uso de cables de alta temperatura (baja flexión) en lugar de los cables convencionales permiten transportar intensidades de corriente mucho más altas. No obstante, algunos autores han investigado los CM generados por líneas eléctricas con este tipo de cables y determinaron que los niveles de CM no sobrepasaban los límites establecidos (Szuba, 2012).

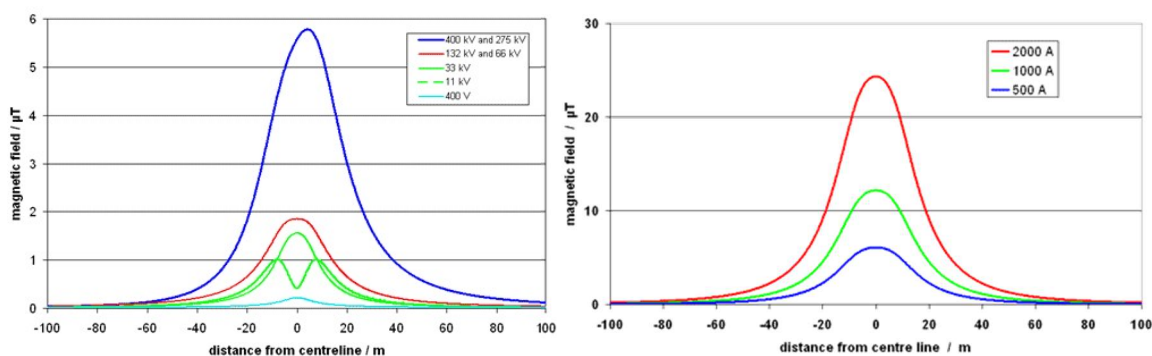


Figura 2. 12. Niveles de campo magnético según diferentes voltajes (imagen izq.) y para diferentes intensidades de corriente. Fuente: EMFs.info, 2023

Por otra parte, el campo magnético resultante depende de la corriente neta que no tiene por qué ser proporcional a la carga de la línea. Tampoco las intensidades eléctricas son constantes a lo largo del tiempo, sino que están sujetas a variaciones de la demanda energética estacionales y diurnas, por lo que los CM también varían a lo largo del tiempo en función de las variaciones de la corriente que los genera. Esta variación también se ha comprobado que puede ser interanual y que no es posible asemejarlas en un periodo temporal plurianual (Kaune et al., 1998).

- **Corrientes desequilibradas.** Las corrientes desequilibradas pueden producirse entre circuitos o dentro de cada circuito. En las líneas de doble circuito las corrientes no suelen ser idénticas en cada uno de ellos, lo que da lugar a una atenuación de la cancelación parcial entre los campos que tiene lugar cuando las fases se encuentran transpuestas. A mayor equilibrio, la cancelación entre CM será mayor y este efecto se hace más notable a mayores distancias a la línea. Si las fases no se encuentran transpuestas, las corrientes desbalanceadas no tienen una influencia significativa. Aunque el sistema de trabajo de una línea de transmisión

está diseñado para que la tres fases de un circuito se mantengan equilibradas, siempre va a existir, por diferencias de impedancia, un pequeño desequilibrio dentro del circuito que generará la corriente de secuencia cero. El campo magnético generado por esta corriente, aunque resulta muy pequeña en comparación con la corriente total (corriente de secuencia positiva), puede prevalecer sobre el campo magnético generado por la corriente principal a una distancia suficientemente alejada de la línea, ya que, si bien este campo decrece con la razón del cuadrado o del cubo de la distancia según la disposición de las fases, el CM generado por la corriente de secuencia cero decrece únicamente con la distancia (CIGRÉ, 2009).

- **Corrientes en el conductor de tierra.** Cuando existe más de un circuito, parte de la corriente desequilibrada pasa al conductor neutro. En redes donde en determinadas zonas el conductor neutro se encuentra conectado a tierra, puede ocurrir que la corriente que circula por él vaya a tierra y se recircule por instalaciones subterráneas como tuberías de agua, haciendo que el CM aumente en las zonas por donde pasan estas otras instalaciones. Esto puede causar mayores valores de CM en el interior de una vivienda que es atravesada por dichas tuberías inducidas. No obstante, estos campos suelen ser mínimos y junto los CM generados por las actividad doméstica habitual componen el denominado “campo de fondo” que, aunque fuera del alcance de los CM generados por las LEAAT pueda ser el campo predominante, su valor es notablemente bajo.
- **Corrientes de imagen.** Los campos magnéticos pueden inducir corrientes eléctricas en el suelo por ser este un medio conductor. Estas corrientes, que se dispersan por todo el suelo, pueden considerarse como una única corriente a una determinada profundidad la cual dependerá de la resistividad del terreno. A este efecto se le conoce como corriente imagen y a su vez generará nuevos campos magnéticos además del CM generado directamente por la corriente circulante en la línea. Sin embargo, estos campos, al igual que ocurre con los originados por las corrientes del conductor de tierra, son muy pequeños y únicamente cobran un peso significativo del campo total a distancias muy alejadas de la línea, donde los

niveles de CM caen a valores de fondo (EMFs.info, 2023). En la Figura 2.13 se muestran niveles de campo magnéticos calculados para diferentes resistividades del terreno. Se observa como en terrenos pocos resistivos, la corriente imagen crea un campo distinguible del total a aproximadamente 300 m y en terrenos muy resistivos, a partir de los 500 m.

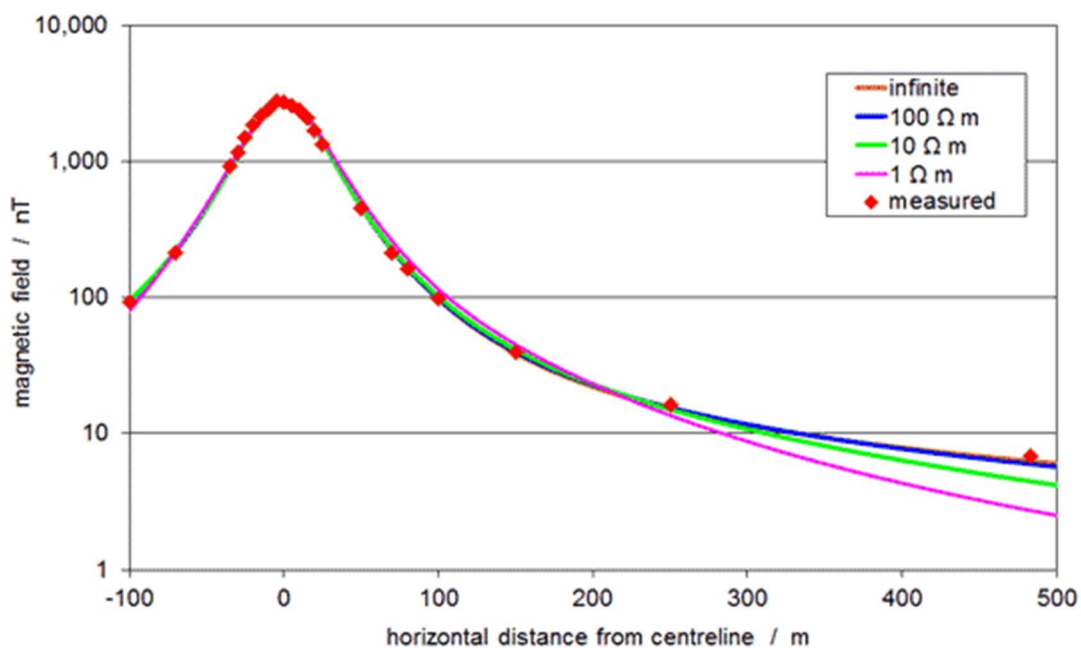


Figura 2.13. Niveles de campo magnético según resistividades del terreno. Fuente: EMFs.info, 2023

- Distancia a la línea.** La distancia a la fuente de CM es un factor determinante en la intensidad del CM. A distancias muy pequeñas de la línea el campo predominante es el generado por la corriente de secuencia positiva, por lo que es posible suponer que la línea se encuentra balanceada. A distancias mayores, estos campos se vuelven insignificantes, pero sí deberían tenerse en cuenta los campos generados por las corrientes desequilibradas, así como el reflejo del conductor en el suelo. En la Figura 2.14, la gráfica A (color verde) muestra el CM calculado considerando solo la corriente principal directa; en la gráfica B (color azul) se incluyen los campos generados por las corrientes de secuencia cero y en la C (color naranja), los campos por corrientes del neutro y del reflejo en tierra.

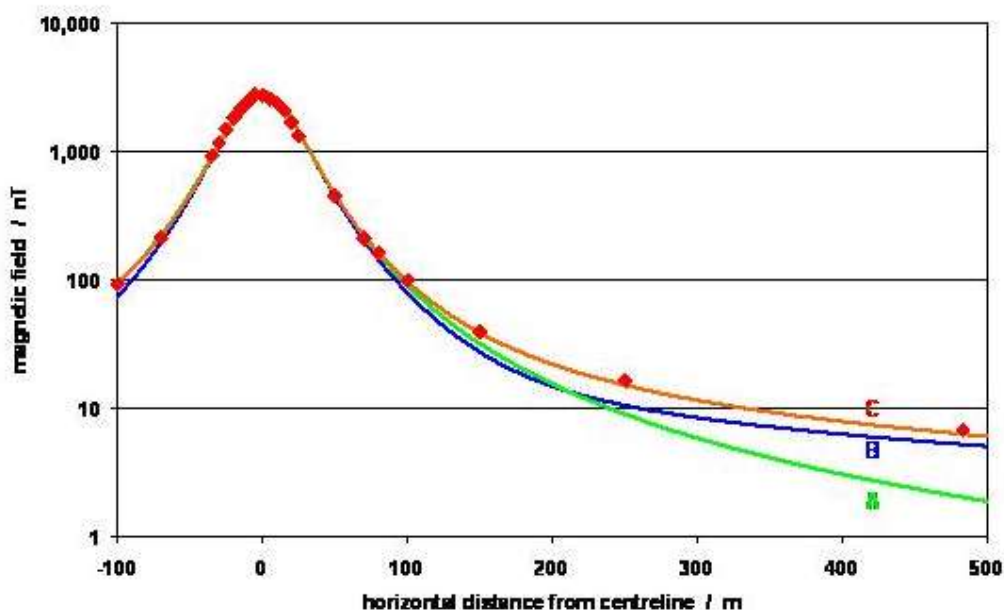


Figura 2. 14. Niveles de campo magnético directos, con corrientes desequilibradas y por imagen. Fuente: EMFs.info, 2023

- Altura de los cables sobre el suelo.** Realmente este factor es una particularidad de que los campos magnéticos pierden intensidad con la distancia a la fuente. Esta atenuación, tal y como se ha descrito anteriormente, dependerá de la configuración de las fases, haciendo que la reducción sea proporcional al cuadrado o al cubo de la distancia. La distancia mínima entre un punto del terreno y la línea, considerando el relieve completamente llano, será directamente bajo las cables. La altura de los conductores sobre el suelo estará determinada por el pandeo de los cables y el relieve del terreno, que deberá respetar las medidas mínimas recogidas en la normativa pertinente para garantizar la seguridad de las personas. Estas distancias dependerán del voltaje de la línea, de manera que las líneas eléctricas con voltajes nominales más altos requieren alturas mínimas de los cables también mayores según la norma UNE-EN 50341-1:2017 (AENOR, 2017).

Esta separación entre los cables y el suelo o respecto a construcciones ubicadas bajo estos puede variar con el tiempo: cuando las corrientes circulantes son muy altas y/o la temperatura ambiente también lo es, se produce un mayor hundimiento de los cables que debe ser tomada en cuenta durante el diseño de la instalación de

manera que la tensión mecánica del cable garantice las separaciones mínimas de seguridad en todo su trazado. De hecho, existen numerosas técnicas de monitoreo de la posición de los cables a lo largo del tiempo y algunos autores han utilizado incluso registros de valores de CEM para la estimación de dicho hundimiento (Kitic et al., 2022; Zuo et al., 2022).

En el Reino Unido, la separación habitual es de 7.6 m, que para una línea de 400 kV a máxima carga generaría justo debajo de los cables un CM de 100 μ T. No obstante, esta distancia de seguridad suele sobredimensionarse, además de que las líneas suelen operar a menor carga que la máxima admisible por lo que no se alcanzan temperaturas muy elevadas en el conductor, dando lugar a campos magnéticos más bajos que los máximos teóricos que pudieran alcanzarse para esa línea. Horton & Goldberg, (1995) analizaron la distancia a la línea eléctrica a partir de la cual la altura de los conductores se tornaba insignificante. Concretaron que, para una línea de 500 kV, esto ocurría a partir de los 50 m y para líneas de 230 y 132 kV, a los 20 m. De igual manera, Kostyszyn & Miśków, (2022) concluyeron para una línea de doble circuito de 400 kV cargada a 868 A que la altura de los conductores sobre el suelo dejaba de tener efecto a partir de los 40 m a la línea, tal y como se observa en la Figura 2.15.

- **Líneas eléctricas aéreas en paralelo.** Cuando dos líneas de transmisión discurren en paralelo una junto a la otra los campos generados por los cables de cada una de ellas pueden verse incrementados o atenuados dependiendo de las cargas relativas en cada instante de tiempo y de la disposición de las fases relativas entre las líneas. Sin embargo, este efecto es mínimo y en el entorno de la línea el campo predominante es el propio de la línea. Únicamente en la zona intermedia entre ambas, los campos individuales se agregan, pero son casos excepcionales donde existen edificaciones entre dos tendidos eléctricos de alta tensión.

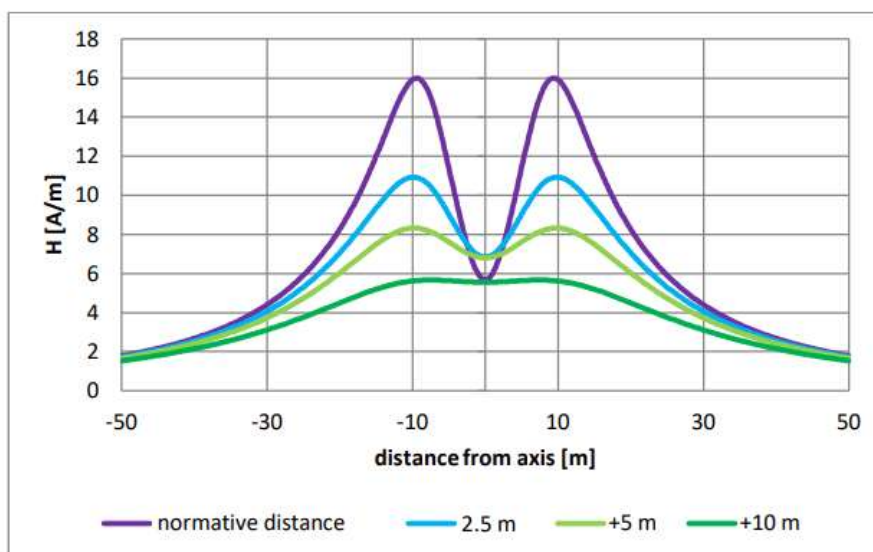


Figura 2. 15. Niveles de campo magnético para diferentes alturas de los conductores sobre el suelo. Fuente: Kostyszyn & Miśków, 2022

2.2.3.3. Técnicas de mitigación del CM

El crecimiento de la demanda energética de las últimas décadas requiere la planificación de líneas de transmisión de alta eficiencia. Algunas de las técnicas que se aplican a las líneas de transmisión para maximizar su carga (léase las comentadas al final del apartado 2.2.2), pueden dar lugar a un aumento del campo magnético tanto en la superficie del conductor como a nivel del suelo. El primer efecto requiere ser abordado al objeto de minimizar las pérdidas, como las causadas por el efecto corona, y el segundo, para garantizar la seguridad tanto en el hábitat como en las instalaciones (tuberías, etc.) de su entorno, así como el cumplimiento de los valores máximos de la exposición residencial de campo magnético. Sin embargo, las medidas adoptadas para reducir el campo magnético conllevan efectos secundarios en el funcionamiento de la línea (Costea & Băran, 2017).

Una medida que, además de actuar sobre los niveles de CM, reduce los niveles de estrés en la población por la percepción social adversa a este tipo de instalaciones es su soterramiento. Los CM generados por redes subterráneas suelen estar situados a menos distancia respecto al suelo que una LEAAT, lo que a priori daría lugar a que, en las proximidades de la instalación, el CM generado sea mayor que el generado por el cable

aéreo. No obstante, en las redes subterráneas es posible disponer los cables mucho menos separados entre sí que cuando van anclados a las torres eléctricas, lo que da lugar a que, en general, se obtengan campos más bajos y con una caída mucho más rápida que la línea eléctrica aérea equivalente. No obstante, el soterramiento de las líneas eléctricas aéreas como medida de mitigación no siempre genera una reducción de los CM pues, aunque el valor de su intensidad decae más rápidamente con la distancia en líneas subterráneas, al estar estas situadas a menos distancia del suelo, en la zona de paso de las mismas los valores de CM pueden ser mucho más elevados (Lamkitja & Tarateeraseth, 2023). A esto se debe añadir que no siempre resulta técnica ni económicamente viable realizar un trazado bajo tierra.

Existen varios métodos de reducción del campo magnético generado por LEAAT que no requieren su soterramiento, los cuales pueden clasificarse en técnicas intrínsecas y técnicas extrínsecas, dependiendo de si la actuación se desarrolla directamente sobre la línea o mediante otra instalación. Las primeras consisten en modificar los parámetros de diseño de dicha línea, descritos en el apartado anterior. La otra opción consiste en la instalación de dispositivos ajenos a la línea pero que situados en su proximidad o cerca de la zona que se quiere proteger presentan la capacidad de mitigación de los CM. Dependiendo de la forma de trabajo, estas técnicas extrínsecas se clasifican a su vez en técnicas activas y pasivas (CIGRÉ Working Group C4.204, 2009) tal y como se recoge en la Tabla 2.2.

Técnicas intrínsecas	Parámetros geométricos	-Altura de los cables
		-Disposición y compactación de las fases
		-Número de circuitos
		-División de la fase
		-Transposición (cancelación entre fases)
Técnicas extrínsecas	Técnicas Pasivas	-Bucles pasivos
		-Escudos conductores
	Técnicas Activas	-Escudos ferromagnéticos
		-Superconductores
		-Bucles Activos

Tabla 2. 2. Medidas de mitigación del CM generado por una LEAAT

I. Técnicas intrínsecas

El incremento de la altura de los cables sobre el suelo es un método que requiere la utilización de estructuras de soporte más altas y por consiguiente tiene un impacto significativo en el coste final de la instalación. En un estudio comparativo de los valores de intensidad del CM para todas las líneas eléctricas de 110 kV y 400 kV de la República Checa y de Eslovenia, observaron que la separación de 8 m sobre el suelo, típica en esas redes eléctricas nacionales, no siempre era suficiente para garantizar los niveles de exposición por debajo de los límites recomendados (Bendík et al., 2021). Otros autores han propuesto soluciones más económicas incrementando solo la altura de la fase central en una configuración delta para una línea de 500 kV, pasando los valores máximos de intensidad de CM de 30,852 A/m a 23,432 A/m para alturas de 18 m a 26 m respectivamente (Dein et al., 2022).

En líneas de doble circuito, es posible lograr una reducción del campo similar a la descrita de forma más económica mediante un reordenamiento de las fases, por ejemplo, en una configuración de baja reactancia. La disposición óptima se obtiene mediante configuraciones verticales en superhaz (Bravo-Rodríguez et al., 2019) con la transposición de las fases superior e inferior del segundo circuito (imagen b de la Figura 2.16). Este método es incluso más barato que la división de fases, ya que no requiere la aportación de más subconductores ni otro material necesario para realizar dicha división. Si además se realiza su compactación (reducción del espacio libre entre las fases) es posible lograr una reducción adicional, de hasta un 56% del campo total.

Moura et al., (2022) realizaron un estudio multiobjetivo para optimizar la disposición geométrica de los conductores de manera que aportaran incrementos máximos de la capacidad de transmisión de las líneas eléctricas con una reducción máxima del campo magnético. Basándose en disposiciones simétricas de las fases y ampliando también la distancia entre ellas lograron una mejora del 17.5% en la capacidad máxima de transferencia de energía con una reducción del 32.8% del CM, respectivamente. Sin embargo, estos mismos autores destacan que una reordenación óptima de los conductores con el fin de minimizar las emisiones de campo magnético puede entrar en conflicto con el campo eléctrico generado por la línea, haciendo que este

alcanza valores no deseables tanto desde un punto de vista técnico como de seguridad, por interferir con otros efectos capacitivos e inductivos de la línea. Incluso cuando ambos campos son optimizados, puede generarse ruido audible en niveles no deseados (Dezelak et al, 2011; Rankovic' et al., 2011). Por tanto, la optimización de la disposición de los conductores para alcanzar los niveles de CM más bajos posible se encontrará limitada por la optimización de otros efectos que se generen en las líneas.

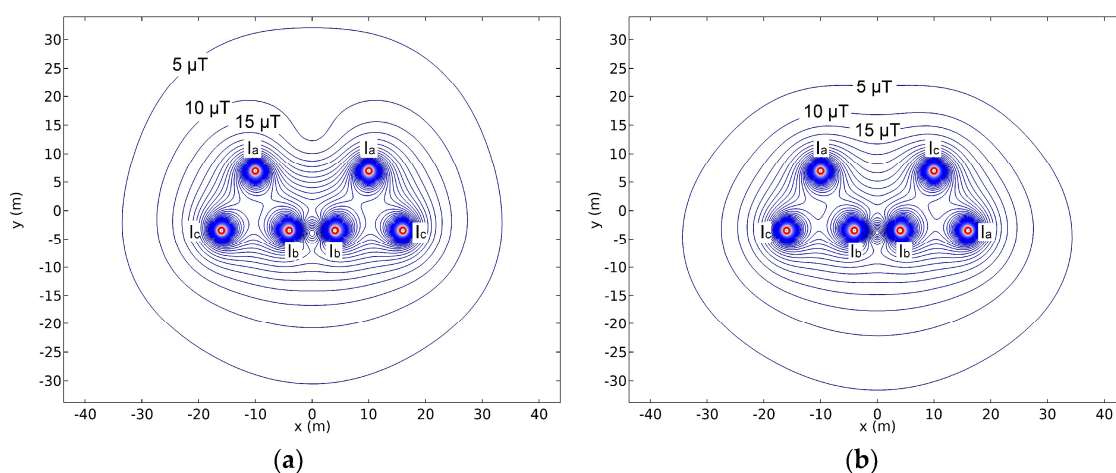


Figura 2.16. Configuraciones óptimas de fases para la reducción del CM en líneas de doble circuito. Fuente: Bravo-Rodríguez et al., 2019

Otras técnicas, como la transposición de las fases solo es posible aplicarla a líneas de doble circuito. Por tanto, las técnicas intrínsecas no siempre tienen la capacidad de proporcionar los niveles de reducción deseados. Las técnicas extrínsecas, en cambio, si pueden proporcionar un efecto de mitigación mucho mayor, tal y como se detalla en el apartado siguiente.

II. Técnicas extrínsecas

Los bucles pasivos consisten en una instalación de conductores que al ser atravesados por el CM generado por la LEAAT se inducen en este bucle una fuerza electromotriz (Ley de Faraday) proporcional a la tasa de cambio del CM que lo genera, dando como resultado una compensación importante del mismo. La capacidad de atenuación dependerá del número de vueltas del bucle, de su orientación en el espacio, así como de la capacitancia, que deben seleccionarse de forma óptima para lograr el efecto requerido en función de los costes de la instalación. Lee et al., (2011) valoraron esta disminución del CM en una

zona residencial donde determinaron que podría obtenerse una reducción del 26% del campo mediante un bucle pasivo formado únicamente por conductores, pudiendo alcanzar hasta un 50% de reducción si además se instalaba en serie un condensador de compensación. En la imagen izquierda de la Figura 2.17 se muestra un esquema de la instalación de un bucle junto a una vivienda unifamiliar y en la imagen de la derecha de la misma figura, se muestra una instalación real de un bucle (cable sostenido entre dos postes) con el fin de atenuar el CM generado por las LEAAT adyacentes.

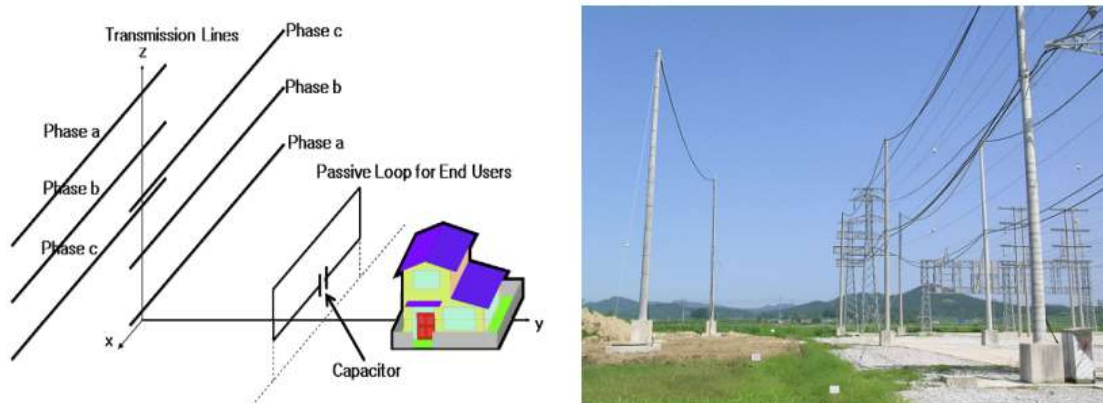


Figura 2. 17. Esquema de bucle pasivo (imagen izquierda) y aplicación real (imagen derecha). Fuente: Lee et al., 2011

Otras soluciones pasivas son el uso de escudos conductores, cuya capacidad de mitigación también se basa en el Principio de Faraday, así como de escudos ferromagnéticos, que por capacidad de ordenamiento de los momentos magnéticos genera un alejamiento de las líneas de CM. Un análisis detallado de las diferencias entre los escudos conductores y magnéticos, así como ejemplos de aplicaciones prácticas sobre línea eléctrica real se recogen en Bavastro et al., (2015). En la investigación realizada por estos autores revistieron un edificio con placas de aluminio (escudo conductor) y posteriormente con un escudo ferromagnético formado con placas de grano de hierro orientado (FeGO) (Figura 2.18).

Estos autores también resaltan la importancia de los materiales superconductores en los cuales tiene lugar el efecto Meissner, que consiste en la desaparición total del flujo del CM en el interior del superconductor y en la expulsión de las líneas de CM hacia al

exterior, lo que los hace una alternativa de mitigación de elevada eficacia, aunque debido a su alto costo son raramente utilizados.



Figura 2. 18. Imagen de recubrimiento de edificio mediante placas conductoras. Fuente: Bavastro et al. 2015

En la Figura 2.19 se comparan el factor de blindaje (SF de sus nombre en inglés Shielding Factor) entre un escudo conductor y otro ferromagnético, instalados a 20 cm de un circuito monofásico. El factor de blindaje, habitualmente utilizado para comparar diversos dispositivos de reducción del campo magnético, expresa la relación entre los valores de intensidad del CM con y sin el blindaje.

También se ha investigado el efecto del grosor de un escudo de aluminio sobre la cubierta de un edificio mediante técnicas de simulación (Tong et al., 2016). Los investigadores obtuvieron que la intensidad de CM disminuyó exponencialmente con el aumento del espesor del escudo conductor y para los 10 mm de grosor máximo testado de dicho escudo, obtuvieron una reducción máxima del 30% del campo magnético obtenido sin protector. Al objeto de encontrar una solución más que aportara un menor peso estructural al edificio, sustituyeron esta placa por una rejilla formada por barras tubulares, analizando la idoneidad tanto de diferentes diámetros (3, 6 y 9 mm) como la separación óptima de dichas barras (30x30, 20x20 y 10x10 cm). Concluyeron que esta última variable tiene un mayor efecto de mitigación que el grosor de las barras, siendo

este efecto inversamente proporcional al espaciado de la cuadrícula. No obstante, la mitigación máxima lograda supuso aproximadamente un 77% sobre la obtenida con la placa de aluminio.

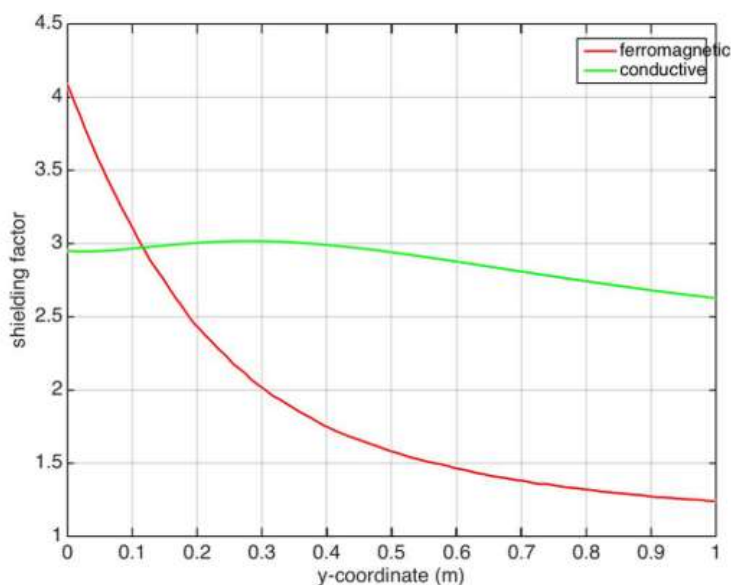


Figura 2. 19. Gráfica de factor de blindaje con un escudo ferromagnético y otro conductor.
Fuente: Bavastro et al., 2015

Otra forma de mitigar el CM es generando uno opuesto. Esto es posible conseguirlo inyectando una corriente eléctrica en un sistema de bucle, la cual pasa a generar un CM contrapuesto de manera activa que permite controlar de forma específica el nivel de atenuación adecuando la intensidad y la fase de la corriente circulante en el bucle. Este efecto ha sido comprobado modelizando y validando sistemas activos basados en una bobina única con un circuito único de compensación. Mediante esta técnica se ha logrado tanto reducir los niveles de CM generados por una línea de simple circuito (Shenkman et al., 2005) como de varias líneas eléctricas en el entorno de una zona edificada bajándolos a valores recomendados (Kuznetsov et al., 2018). Este método activo permite obtener reducciones del CM mucho mayores que con los métodos anteriores, pero conlleva la instalación de equipos más complejos y costosos. En la Figura 2.20 se observa la instalación de un bucle activo en la cubierta de un edificio.



Figura 2. 20. Bucle de compensación activa instalado en la cubierta en un edificio. Fuente: Shenkman et al., 2005

La combinación de diferentes técnicas para evitar niveles indeseados de CM es una solución posible, que pasa por contar con herramientas que proporcionen una relación óptima entre los sistemas de mitigación y las condiciones de funcionamiento de la línea. Existe publicado un estudio detallado de los algoritmos de optimización más destacables en el diseño de sistemas de mitigación de CM FEB (Bravo-Rodríguez et al., 2019).

2.3. Mediciones de campos magnéticos

La medición de campos magnéticos generados por líneas eléctricas se realiza mediante instrumentos con una banda de frecuencia seleccionada de 50-60 Hz. Los dispositivos utilizados pueden ser de un eje, en cuyo caso las lecturas de la componente del CM perpendicular al suelo (B_x) deberán realizarse orientando correctamente la sonda para a continuación registrar los valores de las demás componentes ortogonales entre sí (B_y , B_z). La resultante del campo magnético vendrá dada por la Ecuación 4. Cuando el medidor está dotado con una sonda triaxial, la orientación de la sonda en el espacio es indiferente y habitualmente el aparato proporciona directamente el valor eficaz de la inducción.

$$B = \sqrt{B^2x + B^2y + B^2z} \quad (4)$$

Siendo B la raíz cuadrada de la media cuadrática (RMS de sus siglas en inglés) de las tres componentes ortogonales del CM.

Para que los resultados obtenidos en una medición sean comparables con otros valores observados para la misma línea, por ejemplo, en otro periodo de tiempo, o bien comparable con los valores observados para otras líneas, se requiere que los instrumentos cumplan una serie de condiciones, así como que los procedimientos a seguir en la toma de medidas sean uniformes. Por tanto, la normalización de los procedimientos de medición facilita también que los resultados entre estudios científicos sean comparables y de igual manera, supone un requisito indispensable cuando se quiere realizar la validación de campos calculados mediante su comparación estadística con los valores medidos. Existen algunos problemas asociados a las mediciones de CEM por lo que se ha propuesto que las validaciones debieran realizarse utilizando valores promedios calculados y no valores máximos (Szuba, 2012). Los estándares sobre mediciones de CM generados por LEAAT más destacables son:

- IEC 61786-1:2013 de “Medición de campos magnéticos de CC, magnéticos de CA y eléctricos de CA de 1 Hz a 100 kHz con respecto a la exposición de seres humanos - Parte 1: Requisitos para los instrumentos de medida y Parte 2: Norma básica para mediciones”, que trata sobre los procedimientos de medición y ha sido publicado por la Comisión de Electrotecnia Internacional (IEC de sus siglas en inglés).
- IEE 644-2019 de “Procedimientos estándar IEEE para la medición de campos eléctricos y magnéticos de frecuencia eléctrica de líneas eléctricas de CA”, donde se establecen procedimientos estandarizados para la medición de los campos eléctricos y magnéticos a nivel del suelo, así como para la calibración de los medidores publicado por el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE).
- En España, la norma UNE 215001:2004 “Procedimientos normalizados para la medida de los campos eléctricos y magnéticos de frecuencia industrial producidos por las líneas eléctricas de alta tensión” (AENOR, 2004) recoge también

procedimientos normalizados para la medida de diversas magnitudes relacionadas con los campos electromagnéticos generados por líneas eléctricas de alta tensión, entre ellas la intensidad del campo magnético.

- También en España, la Asociación Española de la Industria Eléctrica, más conocida actualmente como Asociación de Empresas de Energía Eléctrica, elaboró en 1996 un detallado documento denominado “Protocolo para la medida del campo magnético”, (UNESA, 1996) que además expone como deben realizarse los gráficos de las medidas observadas para que estos sean representativos y homogéneos.

En todos los estándares y recomendaciones, las consideraciones más generales sobre los procedimientos sobre la toma de medidas son que estas deben realizarse a 1 m sobre el nivel del suelo, en puntos distribuidos uniformemente en perfiles laterales perpendiculares al trazado de la línea además de en un perfil longitudinal. No obstante, existen otras recomendaciones para la cota de cálculo basadas en la altura media de la cabeza humana (1,8 m) (1999/519/EC Council of the European Union, 1999).

En la norma UNE, también se recoge el cálculo de la incertidumbre total de medida, que vendrá dada por la incertidumbre del certificado de calibración, la de medida del propio aparato o las asociadas a las condiciones meteorológicas, entre otras. Para ello se basa en la norma de la calidad de la medición y del cálculo ENV 13005:1999 – Guía para la expresión de la incertidumbre en las medidas, que modifica ligeramente la “Guía sobre la expresión de la incertidumbre de una medición (GUM)” (JCGM, 2008). En esta guía, donde se analizan de forma detallada los requisitos necesarios para realizar dicha evaluación y que se ha consolidado como un referente internacional, se define la incertidumbre como “un parámetro asociado a los resultados de la medición, que caracteriza la dispersión de valores que pueden estar asociados con la cantidad medida.” Algunos científicos (Prieto et al., 2015) han propuesto un marco diferente para en análisis de la incertidumbre de los campos magnéticos que presenta la propiedad de adaptarse dinámicamente a los datos a partir de los cuales se calcula dicha incertidumbre.

Es importante destacar que la evaluación de la incertidumbre adquiere importancia cuando se quiere evaluar la adecuación de los valores de CM en el entorno de una línea eléctrica a los valores de seguridad contemplados en las diferentes directrices y límites para limitar la exposición de las personas en general a los campos electromagnéticos (Alihodzic et al., 2022).

2.4. Cálculo de campos magnéticos

El cálculo del campo magnético generado por una línea eléctrica aérea de alta tensión, tanto con fines técnicos como de salud ambiental, requiere métodos que proporcionen resultados precisos. Esta precisión dependerá de la incertidumbre de los datos de entrada, así como de la elección del método de cálculo.

El cálculo exacto del campo electromagnético debe realizarse mediante las ecuaciones de Maxwell, pero a bajas frecuencias, los campos electromagnéticos se caracterizan por ser cuasi estacionarios por lo que es posible desacoplar el cálculo del campo magnético del campo eléctrico, pudiendo obtener de forma individual mediante ecuaciones magnetostáticas la intensidad del campo magnético en cualquier punto del espacio. En estas condiciones, es posible además distinguir entre procedimientos de cálculo en dos dimensiones (2D) y procedimientos en tres dimensiones (3D), dependiendo principalmente de la consideración o no de la curva real que describen los cables de una línea eléctrica aérea.

2.4.1. Procedimientos 2D

Los métodos de cálculo analíticos en dos dimensiones (2D) de la intensidad de MF que simplifican las líneas eléctricas como conductores paralelos, rectilíneos e indefinidos (RI) a una distancia constante del suelo han sido ampliamente utilizados mediante la aplicación de la ley de Biot-Savart (BS) sumando las contribuciones de cada conductor (principio de superposición). Los métodos analíticos se basan en el cálculo de la fórmula de BS o en la evaluación de una solución en forma cerrada de ecuaciones de Maxwell, siendo este último procedimiento menos habitual por ser mucho más complejo. En cualquier caso, a partir de ellos se obtienen expresiones analíticas que incluyen explícitamente todos los parámetros que intervienen en los valores y distribución del CM.

Su aplicación suele ser habitual en casos en los que la geometría del problema tiene alta simetría o simplicidad (CIGRÉ Working Group C4.204, 2009). La teoría de BS también ha constituido la base de numerosos procedimientos de cálculo de CM de líneas eléctricas. Algunos ejemplos son:

- El desarrollo en la expansión en series de potencias (Kaune & Zaffanella, 1992), posteriormente reformulada en términos de números complejos dobles (Filippopoulos & Tsanakas, 2005).
- La descomposición en dipolos de corriente (Pettersson, 1992).
- Su aplicación basada en vectores complejos (Moro & Turri, 2008).
- Su combinación en algoritmos numéricos de la ley de Biot-Savart con el método del potencial promedio (Vujevic & Lovric, 2009).
- La utilización de una red de función de base radial normalizada (NRBF) (Rankovic' et al., 2011).

De estos procedimientos, la simplificación de la ley de BS según la expansión en series de potencias y la descomposición en dipolos resultan de especial interés por presentar entre sus ventajas su utilidad para estimar los niveles de exposición a los CM necesarios en los estudios epidemiológicos, ya que, si bien no son métodos adecuados para el cálculo del CM cerca de los cables, pero sí en puntos sobre el suelo. Cuando la estimación de la exposición residencial a CM generados por LEAAT se realiza mediante cálculos de CM, los puntos de interés se encuentran en el interior de las viviendas o en puntos inmediatos a las mismas. En aquellos países en los que se dispone de normativa al respecto, cualquier construcción debe estar situada a una distancia mínima a una línea eléctrica, lo que asegura que se cumpla esta distancia suficientemente alejadas de los conductores para que estos métodos de cálculo resulten adecuados.

Cruz-Romero (2000), en su tesis doctoral muestra tanto para líneas de doble circuito como para líneas simples, el error introducido en los resultados del CM cuando se aplica la descomposición en serie de potencias, así como la descomposición en dipolos,

en lugar del modelo de cálculo de Biot-Savart sobre un conductor rectilíneo indefinido (RI). Respecto a la descomposición en series obtiene diferencias de entre un 10% y un 50 % bajo la línea, dependiendo de la configuración geométrica de los conductores, obteniendo resultados similares entre las configuraciones de doble circuito, en vertical o horizontal y determinando la configuración en doble bandera con transposición de fases como una de las menos afectadas por el error introducido por ese método de cálculo. En cualquier caso, el error decrece con el alejamiento de la línea quedando por debajo del 10% para un alejamiento mayor de 40-60 m. Un requisito fundamental al objeto de reducir el error de cálculo de este procedimiento consiste en asumir el centro geométrico de la configuración de dichos conductores como el origen de coordenadas para determinar la distancia entre el punto de cálculo y los conductores. Para líneas típicas de 400 kV, los errores obtenidos para la formulación aproximada basada en la descomposición de dipolos resultaron menores que la descomposición en serie, si bien el error para ambos métodos se redujo en líneas de menor voltaje.

Sivakami & Subburaj, (2016) propusieron otros métodos analíticos más modernos basados en algoritmos de optimización de búsqueda del cuco (CS) y en la técnica del controlador neurodifuso (NFC) pero también carecen de la posibilidad de incluir en las condiciones de contorno la forma real de la curva que describen los conductores o el relieve del terreno donde se calcula el CM.

Para líneas de circuito simple o doble, el análisis bidimensional es suficientemente preciso en la mayoría de los casos prácticos. Sin embargo, los métodos 2D no siempre permite calcular la intensidad del CM de forma precisa, si bien, adaptaciones adecuadas de estos a las condiciones y objetivos particulares de cada estudio sí pueden proporcionar resultados confiables (Salari et al., 2009). Por ejemplo, para la determinación de los valores de intensidad a distancias relativamente alejadas de los cables, como en la superficie terrestre bajo estos, una abstracción 2D podría ser eficiente pero no para el cálculo en el espacio entre los cables o en las proximidades de la torre eléctrica. Para esta última situación, si se considera que todo el cable está a la altura más baja del mismo, o incluso si se asume un valor promedio de la altura de los cables para todo el vano, se introduce un importante error espacialmente en el entorno de los apoyos, donde la

separación de los cables al suelo puede ser mucho mayor. Algunos autores indican que estas suposiciones no repercuten significativamente en la precisión de los cálculos siempre que la flexión del conductor sea pequeña en comparación con la longitud del vano (Olsen et al., 1988). Si lo que se quiere obtener es el valor máximo del campo magnético, se puede presuponer el centro del vano como el punto donde debe esperarse la intensidad máxima (IEEE, 2020). No obstante, dependiendo del relieve del terreno o del desnivel del vano, y en general, de la diferencia de cota relativa entre el punto de cálculo y los cables, esta situación podría cambiar.

Unos de los métodos más actuales propuestos están basados en métodos numéricos 2D, siendo ejemplos el método de simulación de carga (CSM) y la técnica de simulación de corriente (CST) (Meriouma et al., 2021). Los métodos numéricos solucionan mediante diferentes alternativas las ecuaciones de Maxwell o una variación más sencilla de estas cuando se pueden asumir ciertas simplificaciones. Estas técnicas pueden ser aplicadas en 2D o en 3D, según se tenga en cuenta o no la geometría real de los elementos involucrados en la generación del CM que se desea calcular, permitiendo determinar valores del CM en situaciones complejas.

Sin embargo, las metodologías analíticas 2D son comúnmente utilizadas por presentar una menor complejidad tanto en la entrada de datos como en los procedimientos de cálculo, así como un menor requerimiento computacional. Además, permiten evaluar de forma sencilla la dependencia funcional de los parámetros eléctricos y geométricos de cada línea eléctrica.

2.4.2. Procedimientos 3D y 2D optimizados

Cuando el objeto del estudio es analizar el CM en la superficie de los cables o a distancias inferiores de su separación al suelo, así como incluir el efecto de las cargas y corrientes en los elementos del entorno de la línea (anclajes, torres, vallas metálicas, instalación de puesta a tierra, etc.), debe recurrirse a procedimientos de cálculo 3D (Krajewski, 2010). También debe recurrirse a estos procedimientos cuando el hundimiento de la línea no es despreciable en comparación con la longitud del vano, existen cambios de dirección importantes entre vanos consecutivos de una línea eléctrica y cuando se deben considerar

diferentes tramos de la misma línea o incluso diferentes tramos de diferentes líneas y en general, en cualquier situación compleja (Budnik & Machczyński, 2006; Lucca, 2011).

Los procedimientos 3D tienen en cuenta la forma real de la catenaria y están basados en una discretización espacial de los conductores en un elevado número de elementos cortos de manera que el CM total se obtiene mediante integración del generado por cada uno de estos elementos según la ecuación de Biot-Savart. Se han propuesto diversos procedimientos donde se aplica la ley de Biot-Savart a diversas simplificaciones geométricas de la catenaria dando lugar a procedimientos de cálculo 2D optimizados, lo que permite reducir la complejidad matemática, el coste computacional y obtener cálculos más precisos que los métodos 2D aplicados al conductor RI, incluso en trazados complejos.

2.4.2.1. Procedimientos 2D optimizados

Uno de los primeros fue realizado (Geri et al., 1995) mediante un código de cálculo basado en una aproximación discreta de la ley de BS aplicada a un aproximación de la curva catenaria mediante un conjunto de segmentos rectos de 3 metros máximos de longitud (Figura 2.21).

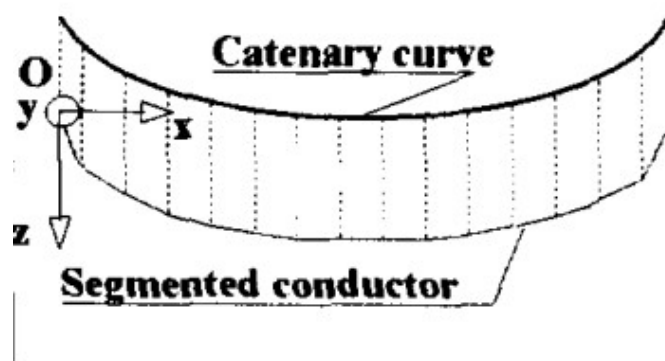


Figura 2. 21. Propuesta de segmentación de la catenaria en elementos rectos. Fuente: Geri et al., 1995

Otros autores han investigado el cálculo del CM modelizando un conductor rectilíneo indefinido, pero con altura variable (Mamishv et al., 1996), con el que el error quedó por debajo del 12% en cualquier posición de la curva alcanzando valores nulos en

la proximidad del centro del vano. En este método se resuelve analíticamente la ecuación más simplificada de BS aplicada a un RI, pero en la que el término correspondiente a la distancia tiene en cuenta la altura real del conductor correspondiente a cada punto de cálculo. Basada en la simplificación anterior, Lucca (2011) presentó un conjunto de fórmulas operativas a un sistema de coordenadas externo no coincidente con el de la torre eléctrica, lo que permite gestionar casos con geometría compleja de LEAAT como cambios de dirección o cruces entre líneas donde sería indispensable aplicar un modelo 3D.

Errores similares a la segmentación lineal de la catenaria, aunque ligeramente más altos, se han obtenido sustituyendo la curva por dos tramos rectilíneos delimitado cada uno por el punto más bajo de la línea en el centro del vano y el punto de anclaje (Cruz-Romero, 2000).

También se ha propuesto la discretización de la catenaria en un número finito de puntos (Dezelak et al, 2011). En la Figura 2.22, se muestra un esquema de dicha discretización. Para una línea de 400 kV cargada con 960 A, y un hundimiento de 8.86 m, la comparación de los cálculos de CM a partir de este modelo con el modelo RI a la altura de 2/3 de la flecha tuvieron un acuerdo cercano al 75%, mientras que, para la flecha máxima, el acuerdo fue del 99.66%.

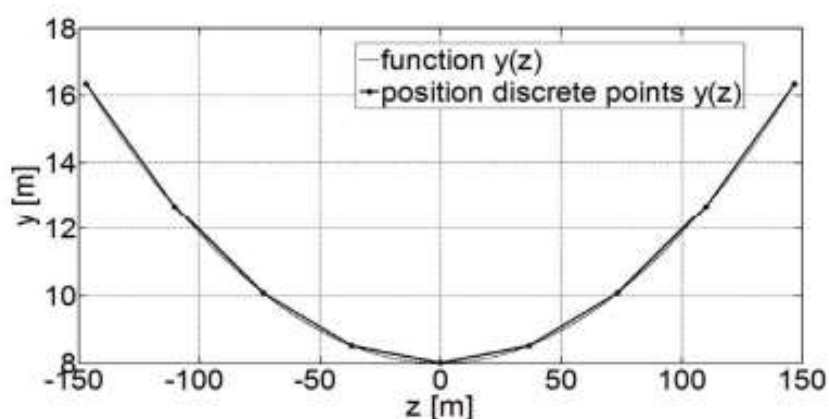


Figura 2. 22. Propuesta de segmentación de la catenaria en puntos. Fuente: Dezelak et al., 2011

Aplicando métodos numéricos (Modrić et al., 2014) se ha podido determinar que la forma de la catenaria de la línea eléctrica aérea puede aproximarse con bastante precisión mediante sólo seis segmentos rectos de alambre delgado, mientras que la aproximación mediante diez segmentos rectos por conductor de tramo de línea eléctrica aérea puede tomarse como óptima desde un punto de vista geométrico.

2.4.2.2. Procedimientos 3D

Entre los métodos numéricos 3D más habituales (Modrić et al., 2015b; Muñoz et al., 2013; Salari et al., 2009) se encuentran:

- el método de diferencias finitas (FDM, de su nombre en inglés Finite Differences Method),
- el método de los elementos finitos (FEM, de su nombre en inglés Finite Element Method)
- el método de los elementos límite (BEM, de su nombre en inglés Boundary Element Method)
- la técnica de simulación de carga (CST, de su nombre en inglés Current Simulation Technique),
- y el método de simulación de carga superficial.

Información detallada sobre estos métodos, así como sus ventajas y limitaciones en comparación con otras técnicas de solución para campos magnéticos se encuentran en los trabajos de Chari & Salon (2000), CIGRÉ Working Group C4.204 (2009), Zhou (1993).

También se han desarrollado algoritmos para el cálculo 3D del campo magnético generado por configuraciones complejas de líneas eléctricas aéreas mediante una implementación de la fórmula de Laplace y la discretización de la catenaria en elementos diferenciales (Landini et al., 2019). El procedimiento proporciona las tres componentes

B_x , B_y y B_z de la densidad de flujo magnético en un punto, en un plano o en una región del espacio.

Entre las principales desventajas que presentan estos métodos, al igual que para los métodos numéricos 2D, destacan su complejidad y la falta de capacidad de parametrización de las variables que influyen en los valores de CM, si bien para reducir esta última limitación estudios recientes están desarrollando técnicas basadas en redes neuronales artificiales (Alihodzic et al., 2021). Otra desventaja de los métodos numéricos es que la gran cantidad de recursos computacionales que requieren implica tiempos muy elevados para el procesado del cálculo. Por ejemplo, en la aplicación de métodos de elementos finitos estos tiempos serán mayores a mayor resolución de malla, pudiendo verse comprometido la calidad de los resultados por este proceso de mallado y los métodos en los que se sustituye la malla por un conjunto disperso de puntos requieren integraciones numéricas de orden superior (Muñoz et al., 2013).

La elección del método de cálculo de CM más apropiado dependerá de las características del problema a estudiar y del compromiso entre la precisión requerida y la eficiencia computacional.

2.4.3. Comparación entre procedimientos 2D y 3D

Los trabajos de investigación para la comparación de métodos 2D y 3D también son habituales. En la tesis doctoral de Cruz Romero (2000) se concluye que el error que se comete en el cálculo del CM mediante la ley de Bio-Savart al sustituir la catenaria por una recta de altura constante (cota más baja del cable), en un área dentro de los 100 m a la línea, se encuentra entre un 10% en el punto más bajo del cable pudiendo incrementarse hasta un 250% de error en los puntos ubicados cerca de las torres.

Otras investigaciones también constatan que un procedimiento 2D clásico es adecuado en la zona donde la altura de los cables es mínima, pero en los demás puntos del terreno situados bajo la línea o próximos a las torres (a una distancia menor a la altura de estas) es necesario recurrir a métodos 3D para obtener resultados precisos (Salari et al., 2009).

Modrić et al. (2015a) en otra comparación entre métodos 2D y 3D ponen de manifiesto la influencia sustancial de tener en consideración o no la forma de la catenaria. En la Figura 2.23 puede observarse en la imagen izquierda una distribución simétrica del CM a cada lado del eje de la línea y contante bajo esta, porque la altura de los cables se supone constante. En la imagen de la derecha, es posible observar el efecto de la catenaria en la variación del CM bajo el eje de la línea eléctrica, siendo mayor en la zona de flecha máxima por encontrarse los conductores más próximos al suelo. Estos investigadores obtienen en su caso diferencias máximas cercanas al 30% cuando se asignan al cable una altura promedio para todo el mismo. La representación gráfica de la densidad de flujo magnético en el entorno de la línea se observa en las figuras inferiores para cada caso. Se aprecia un modelado mucho más preciso cuando se aplica un modelo 3D de cálculo.

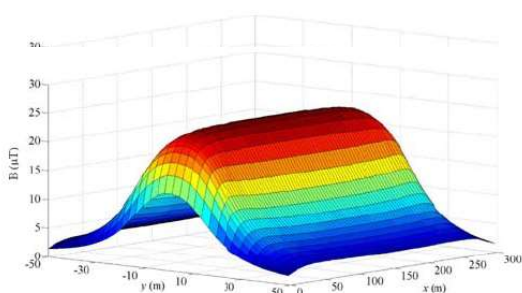


Figure 9. Spatial distribution of the magnetic flux density computed using 2D model.

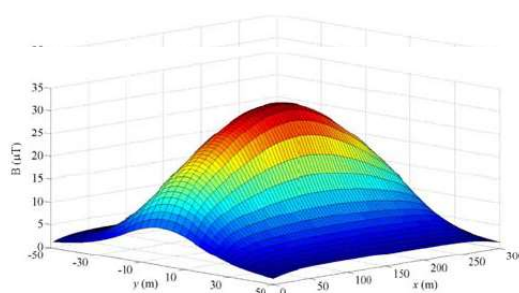


Figure 10. Spatial distribution of the magnetic flux density computed using 3D model.

Figura 2. 23. Modelado del CM mediante un método de cálculo 2D (imagen izquierda) y 3D (imagen derecha). Fuente: Modrić et al., 2015a

El Dein, (2009) investiga además el efecto de la flecha del conductor cuando los vanos presentan asimetrías debidas a diferencias de cotas de la base de sus apoyos y/o diferentes alturas de las torres eléctricas, así como los cambios de dirección entre vanos consecutivos. El autor determina que la diferencia de altura de las torres tiene un efecto pequeño cuando el campo magnético se calcula cerca de la torre pero que este efecto es mayor cuando el cálculo de la intensidad de CM se hace en el centro del vano.

Esta conclusión se corrobora tanto mediante la técnica tradicional de cálculo del CM basada en el conductor rectilíneo como mediante la integración 3D de la catenaria según la ley de Biot-Savart. Ambas técnicas mostraron diferencias importantes en los valores de CM calculados, quedando este sobredimensionado con el método más simple

en la zona de las torres donde la altura real de los cables es mayor al promedio asumido en su abstracción lineal, y dando valores más bajos en la zona donde la separación del suelo fue menor.

Otra evidencia de este trabajo es que a medida que aumenta el ángulo entre vanos contiguos, la intensidad del CM decrece en los puntos del perfil transversal trazado desde la ubicación de la torre (punto P2 de la imagen superior de la Figura 2.24) así como en los del perfil transversal (P1 de la misma imagen) en el centro del vano, pues aumenta la distancia de dichos puntos a la fuente. Puede observarse en las gráficas las reducciones de CM para cada perfil (P1 en la imagen de la izquierda y P2 en la imagen de la derecha), en función del ángulo formado por los vanos.

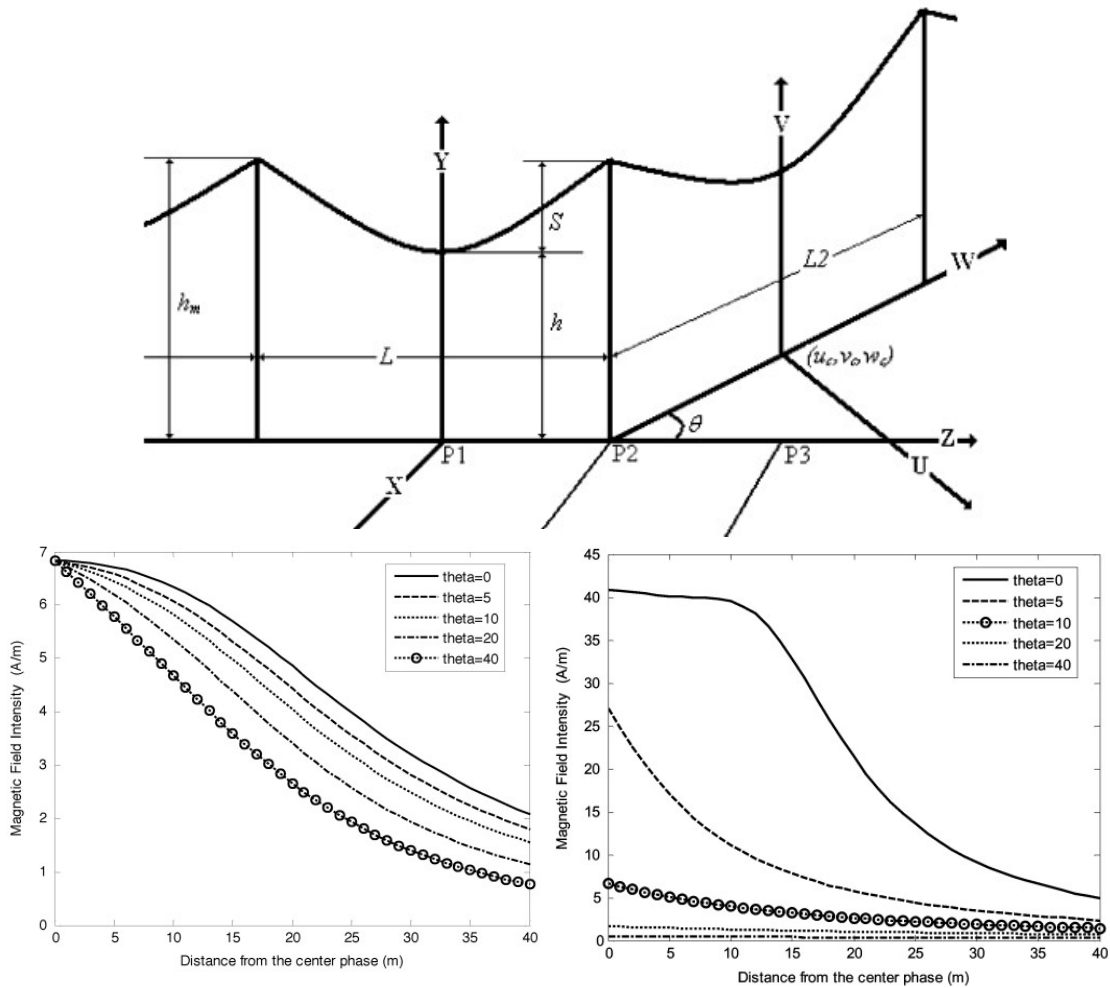


Figura 2. 24. Modelado del CM dado por dos vanos que forman ángulo. Fuente: El Dein, 2009

Sin embargo, el autor no analiza el efecto para los puntos que quedan situados cada vez más cerca de los cables conforme se incrementa el ángulo. Aunque se tienda a pensar que pudiera ocurrir justo el efecto contrario que en sus puntos simétricos, esto es, un aumento del CM por disminuir la distancia a la fuente, este dependerá de las direcciones de los vectores de CM generados por cada línea.

La precisión entre diferentes métodos 3D también ha sido evaluada por Rabah et al., (2019). Estos investigadores analizan una mejora del procedimiento CST que obtiene una alta concordancia con el método basado en la integración 3D. Resaltan, además, la influencia significativa que el pandeo de los cables tiene en la distribución de la inducción magnética generada por la línea eléctrica aérea tal y como puede verse en la imagen izquierda de la Figura 2.25, donde el CM cerca de las torres es muy inferior al generado en la parte más baja del cableado, en el centro del vano. El acuerdo entre los dos métodos 3D se observa en la imagen derecha de la Figura 2.25, donde las gráficas quedan totalmente superpuestas.

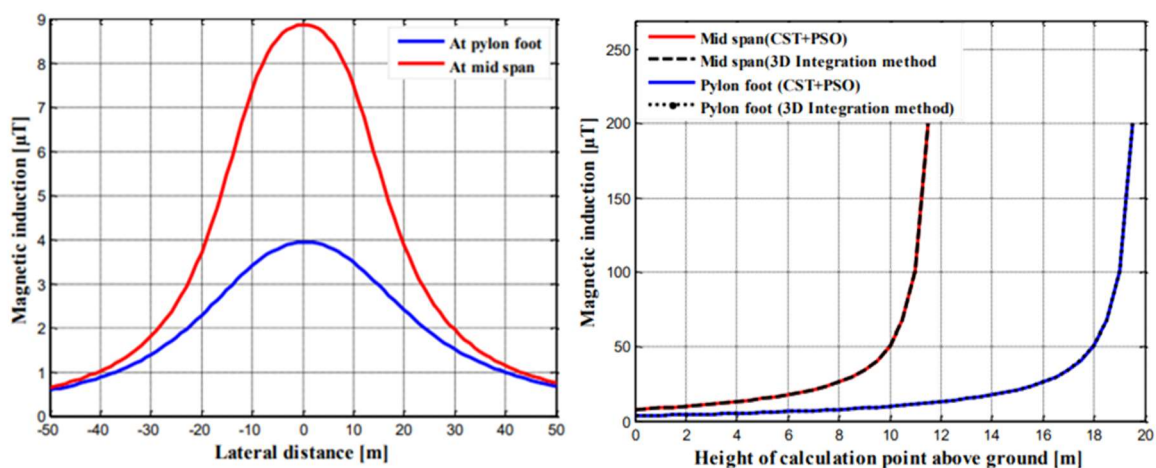


Figura 2. 25. Modelado del CM dado por dos vanos que forman ángulo. Fuente: El Dein, 2009

Como se ha visto anteriormente, el CM puede calcularse mediante ecuaciones matemáticas analíticas que se vuelven mucho más complejas al considerar la catenaria real que trazan los cables, o mediante métodos numéricos. Por tanto, el modelado digital constituye un método especialmente adecuado para la investigación del campo magnético generado por líneas aéreas de transmisión (Deltuva & Lukočius, 2020). La modelización

no sólo permite obtener valores precisos de intensidad del campo magnético, sino que además permite evaluar de forma sencilla la variación de este si se modifican la estructura y dimensiones de la instalación, así como tener en cuenta las diferentes irregularidades y variaciones del entorno.

2.4.4. Otros procedimientos del cálculo del CM generado por LEAAT

Existen otros procedimientos de cálculo de base empírica que utilizan mediciones del CM en el entorno de la línea eléctrica para la estimación de dichos valores. Sin embargo, estos procedimientos resultan costosos en tiempo y equipo y su fiabilidad dependen de las condiciones eléctricas y ambientales durante el proceso de medición (Muñoz Gutiérrez, 2011).

También se han utilizado modelos a escala de una línea de transmisión de 115 kV obteniendo una alta concordancia entre los valores de CM medidos sobre el modelo escalado y los medidos en la línea de referencia real (Escobar et al., 2007). La maqueta (ver Figura 2.26) se utilizó como herramienta de diseño para determinar la distribución del campo eléctrico y magnético alrededor de la línea, de manera que pudieran variar los parámetros básicos de la línea como las configuraciones de las fases o la intensidad de corriente circulante y analizar posibles técnicas de mitigación.



Figura 2. 26. Maqueta para el cálculo del CM. Fuente: Escobar et al., 2007

2.4.5. Salidas gráficas tridimensionales del cálculo del CM

Existen numerosos programas informáticos para la implementación de los métodos de cálculo expuestos y que además disponen de salidas gráficas tridimensionales de los resultados, como EMFTsim2 software, aplicaciones desarrolladas en Matlab, el paquete de software COMSOL Multiphysics, ANSYS Maxwell 2D O LabVIEW. Algunos ejemplos habituales sobre la visualización gráfica de los resultados se han mostrado en las figuras 2.9, 2.10 y 2.25. Otro ejemplo menos habitual se observa en la Figura 2.27 con el que se ha ilustrado el volumen de seguridad alrededor de una línea eléctrica (Moro & Turri, 2012).

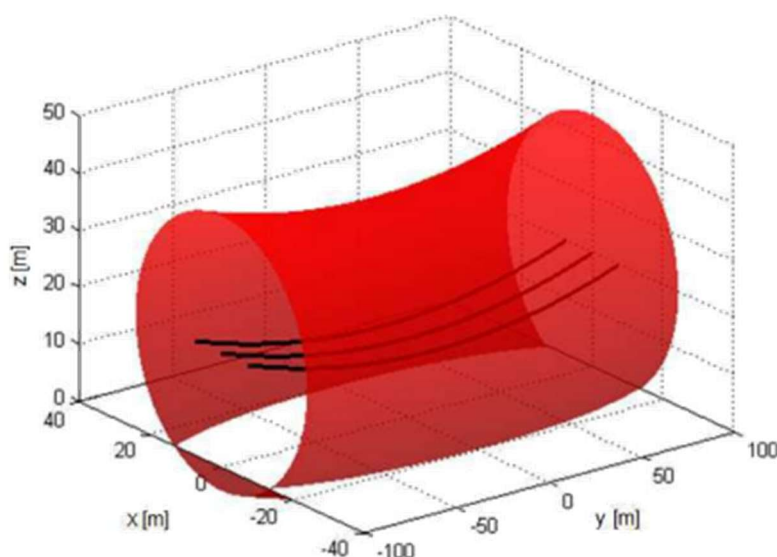
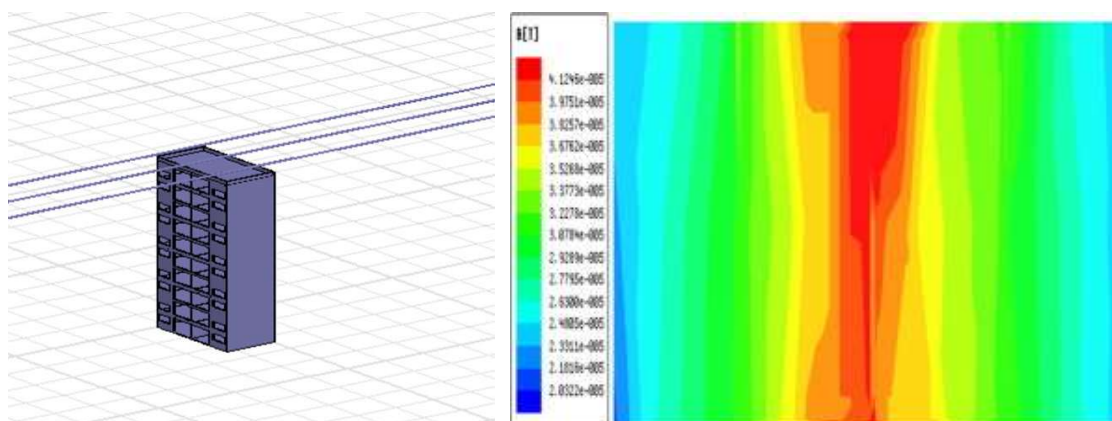


Figura 2. 27. Salida gráfica del volumen de seguridad de CM en el entorno de una LEAAT.
Fuente: Morro & Turri, 2012

Los programas de cálculo de CM como Ansoft Maxwell 3D se han aplicado para modelar un edificio y simular sobre este el CM, cuyos valores se obtuvieron por el método de los elementos finitos (Tong et al., 2016). No obstante, las salidas gráficas fueron bidimensionales y se obtuvieron para la cota de interés, tal y como se observa en la imagen izquierda de la Figura 2.26, que representa los niveles de CM sobre un plano situado a 10 cm por debajo del techo del edificio.



*Figura 2. 28. Salida gráfica del modelado del edificio y de los valores de CM resultantes.
Fuente: Tong et al., 2016*

2.5. Conclusiones del capítulo

Las líneas eléctricas de corriente alterna generan campos magnéticos de frecuencia extremadamente baja. Las redes de transporte y distribución están formadas por un alto porcentaje de líneas eléctricas aéreas que pueden atravesar núcleos poblacionales haciendo que las personas se encuentren expuestas a estos campos. Aunque se están introduciendo líneas de alto voltaje de corriente continua como una alternativa de mayor eficiencia en el transporte de energía para dar solución al incremento de la demanda energética mundial, y que estas líneas no generan campos magnéticos de FEB, los sistemas energéticos de cada país se encuentran ya asentados y se basan en sistemas trifásicos. La optimización de estos sistemas pasa por estudios de multivariantes en los que se trata de determinar que valores de los diferentes parámetros de la línea resultan más eficientes con una generación del CM mínimo. Minimizar los CM resulta una necesidad tanto técnica como de protección de la población en general, ya que los niveles de CM deben estar por debajo de valores recomendados y de la legislación propia de cada país. Sin embargo, las técnicas intrínsecas de reducción del CM tienen limitaciones técnicas y las técnicas extrínsecas son costosas, habitualmente suponen instalaciones de cierta complejidad de aplicación quedando relegado su uso en ubicaciones muy concretas. Por ello, se evidencia la necesidad de generación de mapas de exposición residencial a CM, siendo uno de los objetivos principales de esta tesis doctoral, como una herramienta que permita conocer el alcance de la exposición de la población, así como

gestionar nuevos desarrollos urbanísticos respetuosos con los valores límites de exposición.

Se ha podido concluir según lo expuesto en este capítulo que el cálculo preciso de la intensidad del CM requiere conocer con detalle los valores de los parámetros geométricos, de trabajo de las líneas eléctricas, así como valores de distancia lo más reales posibles entre el punto de cálculo y la línea. Ello requiere el uso de métodos de cálculo 3D o métodos de cálculo 2D optimizados, que consideren la catenaria de los cables, especialmente en vanos largos o con desniveles importantes. Aunque desde hace varias décadas se están desarrollando métodos de cálculo 3D cada vez menos exigentes computacionalmente, los métodos de cálculo 2D optimizados suponen una alternativa de menor complejidad y que pueden ser aplicadas en estudios epidemiológicos de exposición residencial a CM de FEB. Por último, los programas informáticos para el cálculo del CM ofrecen salidas gráficas visuales de los resultados, pero estas representaciones gráficas no son adecuadas para la generación de mapas de CM a escala local o regional o que puedan ser superpuestos a otra cartografía de base.

3. MODELADO 3D CON SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

3.1. Modelos digitales de elevaciones

3.1.1. Definición del modelo digital de elevaciones

En numerosas disciplinas de la ingeniería y de las ciencias ambientales, el conocimiento de la elevación de la superficie terrestre y la de los elementos ubicados sobre ella son claves para el desarrollo de proyectos y estudios de investigación (Felicísimo, 1994; García Santos, 1995). Se define la elevación o altitud de un punto cualquiera en el espacio como la distancia vertical entre este y una superficie de referencia determinada. Esta superficie puede ser un elipsoide de referencia, obteniendo así altitudes elipsoidales, o bien el nivel medio del mar local (geoide), lo que proporciona altitudes ortométricas (datum vertical) (Figura 3.1). Un ejemplo son las alturas elipsoidales de los receptores de sistemas de navegación por satélite (GNSS) que son calculadas respecto al elipsoide WGS84.

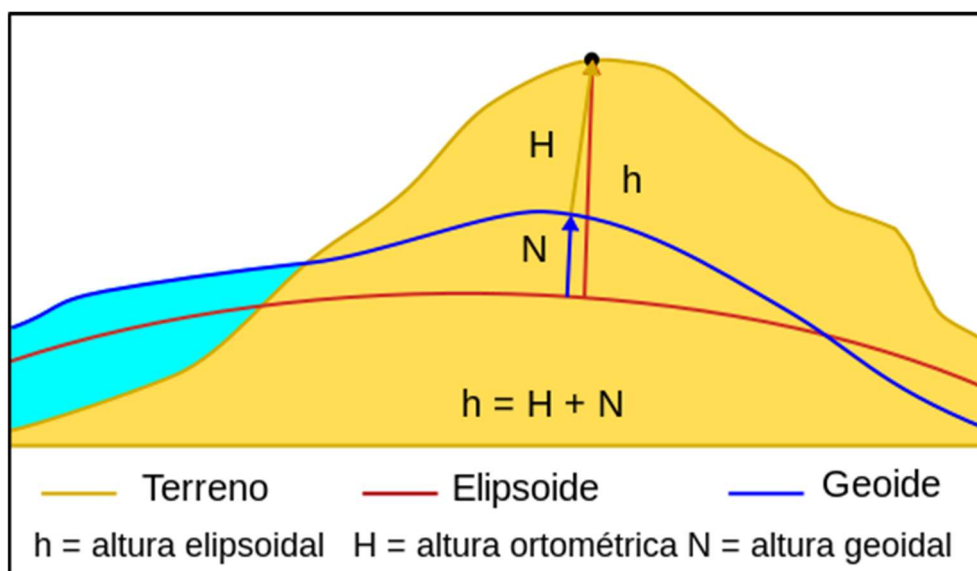


Figura 3. 1. Superficies de referencias de elevación. Fuente: Junta de Extremadura, 2020

La representación gráfica digital de las elevaciones se denomina modelo digital de elevaciones (MDE) y puede realizarse mediante estructuras de datos vectoriales, como son las curvas de nivel y la red de triángulos irregulares (TIN), o mediante estructuras de datos ráster. Los MDE tipo ráster representan el área de estudio mediante una superficie

continua en forma de matriz formada por celdas organizadas en filas y columnas, donde cada celda tiene asignado el valor de la elevación correspondiente a la parcela territorial que representa. El formato basado en celdas es el más habitual por su mayor capacidad de representación de variables de naturaleza continua, tal y como le corresponde a la elevación de la superficie terrestre (Fisher & Tate, 2006). Normalmente los formatos vectoriales constituyen fuentes de datos intermedias para la generación final de un MDE tipo ráster, por lo que es habitual referirse a estos últimos directamente con el término MDE.

Estas superficies continuas son obtenidas a partir de una muestra de valores de elevación del área que se quiere representar (Z. Li et al., 2005), por lo que el MDE es definido como una representación estadística de una superficie continua del suelo mediante un gran número de puntos tridimensionales de coordenadas conocidas (X, Y, Z) en un sistema de coordenadas arbitrarias (Miller y LaFlamme, 1958).

Cuando un MDE recoge todos los datos de elevación tanto del suelo como de los elementos existentes sobre este, ya sean de origen natural (vegetación, bosques, acantilados, etc.) o de origen antrópico (edificaciones, instalaciones industriales, infraestructuras, etc.) se denomina modelo digital de superficies (MDS) que consiste en un modelo digital que incluye además del suelo los obstáculos sobre este y que representa la superficie más elevada del terreno (Figura 3.2). Cuando el MDS únicamente representa datos de elevación del suelo desnudo, se conoce como modelo digital del terreno (MDT). Si además al MDS se le extraen todos los elementos correspondientes al MDT, entonces se obtiene un modelo digital de superficie normalizado (MDSn).

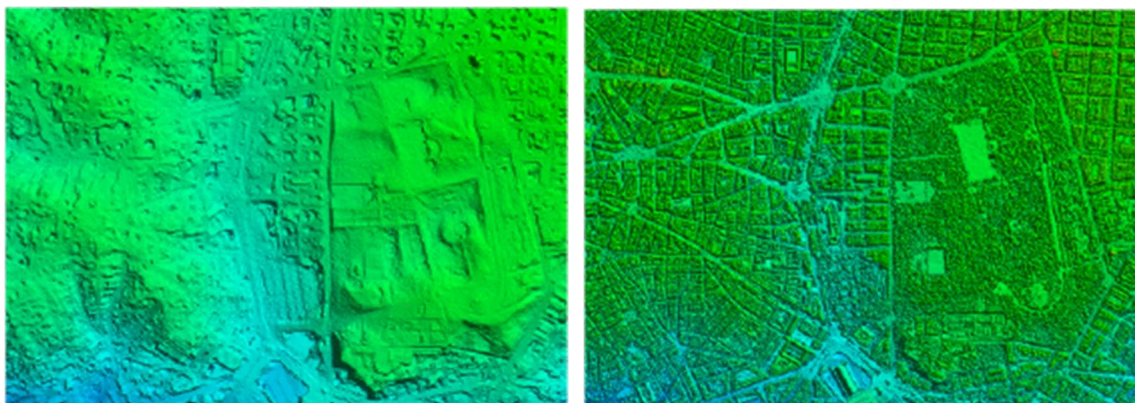


Figura 3. 2. Ejemplo de representación del mismo área mediante un MDT (izquierda) y un MDS (derecha). Fuente: PNOA, 2023

Esta versatilidad de datos junto las actuales herramientas tecnológicas para su procesado permiten modelar y analizar nuestro entorno con un nivel de detalle que los convierten en una fuente de datos de especial importancia. La obtención de MDE en zonas urbanas resulta una tarea de especial interés ya que constituyen la base de muchos estudios de planificación, seguimiento y gestión urbanística, estudios de clima urbano, mapas de contaminación ambiental o potencial de energías renovables, entre otros, que se llevan a cabo mediante Sistemas de Información Geográfica (Wani & Nagai, 2021).

3.1.2. Precisión de los MDE

La precisión del modelo vendrá condicionada por la morfología del terreno, por su resolución espacial (espaciado entre los puntos que conforman la muestra a partir del cual se obtiene el MDE), por la precisión con la que se definen las alturas en esos puntos (Kholodkov et al., 2022) y por el algoritmo de interpolación utilizado para generar la superficie de elevaciones (Polat et al., 2015; Uriel Paredes Hernández et al., 2013). No obstante, aunque la calidad de los MDE suele definirse únicamente en base a su precisión vertical, ya que esta es considerada como el criterio principal para especificar la calidad de los datos de la elevación (*ASPRS Guidelines Vertical Accuracy Reporting for Lidar Data*, 2004), la precisión planimétrica tiene una importante influencia sobre la misma, por lo debe ser informada a pesar de que no existe un procedimiento estandarizado para la documentación de la calidad de los MDE (Mesa-Mingorance & Ariza-López, 2020).

Existen diversos métodos de obtención del MDE cuya elección depende principalmente de si la escala de la superficie a representar es global, regional o local, y no todos estos métodos permiten obtener la misma precisión. En el primer caso, se trata de modelar la Tierra en su conjunto, para lo que suele recurrirse a la captura de datos mediante satélites, imágenes radar procedentes de naves espaciales y/o cámaras hiperspectrales para generar los MDE. Son ejemplos el modelo GTOPO30 del Servicio Geológico de los Estados Unidos, que tiene 1 km de resolución y 30 m de precisión vertical, y el modelo ASTER con una resolución de 30 m y una precisión vertical de 12 m, existiendo otros de hasta 2.5 m de resolución y 5 m de precisión vertical (Kholodkov et al., 2022). Cuando se trabaja a escala regional o local, es posible generar tanto MDT como MDS con un nivel de detalle y precisión todavía mayor. Los procedimientos básicos

utilizados para este caso son tanto de tipo directos, como la altimetría radar o láser y los levantamientos topográficos mediante sistemas de posicionamiento global (GPS) o estaciones topográficas, como de tipo indirecto, mediante restitución de estero-imágenes digitales o de interferometría radar (inSAR) (Felicísimo, 1994). En la Tabla 3.1 puede observarse valores de precisión vertical genéricos según diferentes métodos de capturas de datos para los MDE, así como los diferentes factores que afectan a dicha precisión en cada caso, y las limitaciones de cada método.

Método	Precisión vertical	Factores que afectan a la precisión	Limitaciones principales de cada método
Fotografía aérea	3.0 cm – 14.3 m	Altura de vuelo, resolución, precisión del control terrestre.	Lento, caro, adecuado para áreas pequeñas.
ASTER	10 m – 39 m	Cobertura y relieve superficial, resolución	Baja precisión principalmente para MDE
DOT – 5	5 m	Modelo geométrico, precisión del control terrestre.	Caro
IKONOS/QuickBird	0.2 m – 1.4 m	Orientación del sensor, calidad del control terrestre, modelo 3D utilizado	Cobertura del suelo limitada y costosa, se necesita software sofisticado
InSAR	nivel del medidor	Pendiente, rango de inclinación	Ancho de franja estrecho
SRTM	16 m	Relieve y cobertura superficial	No es muy preciso y la precisión es difícil de mejorar.
LiDAR aerotransportado	Hasta 1 m	Relieve topográfico, relieve superficial, humedad del suelo.	Área cubierta pequeña (en términos globales) y costosa
GNSS (RTK)	2 cm – 4 cm	Longitud de referencia, funcionalidad del receptor	Áreas particularmente pequeñas

Tabla 3. 1. *Métodos de generación de MDE y principales características. Fuente: adaptado de Wani & Nagai, 2021*

Durante los últimos años, el mapeo basado en detección de imágenes por láser y distancia (LIDAR del inglés, Laser Imaging Detection and Ranging) se ha convertido gradualmente en el medio preferido para derivar MDT y MDS. Una presentación sobre

los principios generales para la obtención de MDE mediante esta tecnología se puede encontrar en Chen et al., (2017). Este sistema permite obtener nubes de miles o millones de puntos georreferenciados con datos de elevación, los cuales son obtenidos mediante sensores láser aerotransportados junto a un sistema de posicionamiento global (GPS) y un sistema de navegación inercial (INS). Estos sensores láser lanzan pulsos de luz discretos sobre la superficie terrestre que al ser reflejados por esta permiten calcular la distancia entre el escáner y el suelo.

Una de las principales ventajas frente a los sistemas radar estriba en que la longitud de onda de la luz láser es mucho más corta que la de las ondas de radio, lo que permite medir objetos mucho más pequeños con mayor precisión y nivel de detalle, permitiendo reconocer tipologías de edificios y otras construcciones (Hermosilla, Ruiz, Recio, & Fernández_Sarria, 2009) así como datos de vegetación (Ortiz-Reyes, y otros, 2015). Además, el sistema LIDAR puede registrar datos bajo cubierta vegetal de manera mucho más eficiente que con medios fotogramétricos (National Oceanic and Atmospheric Administration [NOAA], 2012), pues sólo necesitan un mínimo de claros en su envoltura para que los pulsos puedan penetrar a través de ella y detectar el suelo, mientras que la restitución de imágenes requiere que esos puntos bajo la vegetación puedan verse en una pareja de imágenes tomadas desde distintos ángulos, lo cual no siempre resulta factible.

Por el mismo motivo, resulta también más efectivo para la generación de MDE urbanos que obtenerlos a partir de imágenes estéreo. Su elevada precisión hace que los datos LIDAR se asuman como valores de referencia para investigar la exactitud de los MDE obtenidos mediante otros procedimientos incluso a escalas globales y en diferentes entornos, en especial donde los datos 3D con un alto nivel de detalle y precisión son un requisito indispensable para el usuario (Meng et al., 2010a; Peeroo et al., 2017).

En un análisis de la precisión vertical del MDE “TanDEM-X” (Zhang et al., 2019), uno de los conjuntos de datos de elevación globales más importantes que se han realizado y que fue generado a partir de sensores radar SAR de un transbordador aeroespacial por Centro Aeroespacial Alemán, utilizaron como valores de referencia datos LIDAR aéreos de 8 puntos por m² de densidad. Estos fueron tomados sobre 4175 km² de la zona del sur de Florida, escogida para la validación del MDE SAR por su variada tipología urbanística

y de vegetación. Los datos LIDAR fueron a su vez, validados mediante mediciones GPS y obtuvieron un error cuadrático medio (RMS) horizontal inferior a 0.067 m y en elevaciones (RMSE) cercano a 0.06 m. Las elevaciones obtenidas mediante radar tuvieron un buen acuerdo con las láser en zonas de campo abierto y con un RMSE de 0.49 m mientras que en zonas de edificios altos hubo importantes discrepancias (RMSE de 35.70 m), si bien en zonas urbanísticas densas, pero de poca altura, las diferencias con los datos LIDAR mejoraron significativamente según un RMSE cercano a 2 m.

También Breytenbach et al., (2019) evaluaron la precisión de la elevación de nueve tipos de MDE globales y nacionales con diverso origen de datos (fotografía aérea estéreo digital, inSAR, entre otros) en ciudades de Sudáfrica, que también se caracterizan por tener entornos urbanos heterogéneos y cubiertas sustanciales de vegetación. El MDE de referencia se obtuvo a partir de datos LIDAR con un error medio cuadrático de elevación RMSE de 0.08 m. Entre los MDE analizados, los de mayor resolución (30 m) mostraron errores absolutos medios (MAE) de entre 1.21 y 3.20 m, siendo los errores más bajos para los de 2 y 4 m de resolución, con 0.26 y 0.56 m respectivamente de MAE.

Un análisis exhaustivo sobre la evaluación cuantitativa de la precisión de datos LIDAR en diversos entornos se recoge por Elaksher et al., (2023). Estos autores, además, aportan la evaluación de la calidad relativa y absoluta de los datos LIDAR utilizando técnicas de topografía terrestre convencional en lugar de GPS, ya que, aunque en términos generales estos tienen una mayor precisión que los datos LIDAR, pueden verse afectados por las distancias al punto base, el tiempo de observación y la disposición satelital. Para ello tomaron una muestra de 440 puntos mediante una estación total TOPCON GTS-303 sobre una zona con numerosas pistas deportivas planas y horizontales, si bien estas se encontraban rodeadas de franjas de drenaje, y la compararon con datos láser de 9.54 puntos/m² de densidad. Los resultados mostraron un RMSE para el total de las alturas absolutas LIDAR de 0.12 m con un valor medio de cero, y una precisión planimétrica promedio de entre -0.60 y -0.30 m.

Para mejorar aún más la precisión de los MDE en zonas urbanas, Wani & Nagai, (2021) propusieron su generación en estos entornos reforzando los sistemas LIDAR con sistemas globales de navegación por satélite global múltiples (multi-GNNS). Con esta

técnica obtuvieron errores de elevación inferiores al decímetro en un entorno urbano del área metropolitana de Bangkok, siendo este método una solución para el modelado de muy alta precisión. Anteriormente, los únicos sistemas de navegación por satélite disponibles eran el GPS y el GLONASS que proporcionaban una precisión, disponibilidad y confiabilidad deficientes de los MDE en algunos entornos cuando, además, los dispositivos de navegación de unidad de Medición Inercial (IMU) son costosos. Teniendo en cuenta las complejidades de las áreas urbanas, el multi-GNSS emerge como una alternativa para una construcción de MDE precisos en estas áreas. La disponibilidad de nuevas constelaciones de satélites de BeiDou y Galileo, la modernización de los sistemas GPS y GLONASS, así como la creación de nuevos sistemas regionales de navegación por satélite, ha generado un incremento significativo del número de satélites que permiten la geolocalización de manera mucho más eficiente, precisa y confiable mediante la integración de estos sistemas en multi-GNSS.

Otra línea de investigación se ha basado en la consideración de las características morfológicas de los diferentes elementos que integran una parcela urbana para la generación de MDE de un área, derivando para cada subelemento MDE particulares bien a partir de datos LIDAR o bien mediante ortofotos de alta resolución, obtenidos ambos mediante UAV, y fusionando posteriormente los modelos individuales en el programa informático ArcGIS obteniendo un MDE final, que obtuvo un RMSE de 0.05 m a una escala de 1:1000 de una zona de 1.4 km², obteniendo una representación de las características topográficas y morfológicas de los diferentes elementos urbanos mejor que con las técnicas de generación de MDE tradicionales (M. Li et al., 2023).

3.1.3. Disponibilidad de datos LIDAR y productos derivados.

En las últimas décadas ha habido un avance importante respecto a la disponibilidad de datos geoespaciales gracias al impulso de varias directivas comunitarias e internacionales, como la Directiva Inspire (Directiva 2007/2/CE) dentro de la Unión Europea (Mesa-Mingorance & Ariza-López, 2020). En la actualidad, la mayoría de los países desarrollados disponen de MDE de alta precisión para todo su territorio producidos por diversas agencias cartográficas, tanto de índole nacional (por ejemplo, el Instituto Geográfico Nacional en España, o el Ordnance Survey en el Reino Unido) como

regionales (p. ej., el Instituto de Cartografía y Estadística de Andalucía, entre otros) e incluso de ámbito local (p. ej., la Infraestructura de Datos Espaciales de la Diputación Provincial de Málaga IDEMAP). El objetivo de estas instituciones es ofrecer una fuente de datos geoespaciales de acceso libre para fomentar el desarrollo, la investigación y el emprendimiento, siendo uno de los productos claves en este desempeño los MDE.

La Sociedad Internacional de Fotogrametría y Teledetección (ISPRS) permite también la descarga de datos de su web y la colaboración en línea para el testeado de algoritmos de procesamiento de nubes de puntos producidas por escaneo láser e InSAR y de la evaluación de precisión (<https://www.itc.nl/isprs/wgIII-3/filtertest/downloadsites/>).

Algunos ejemplos de MDE globales o regionales de acceso abierto son el ASTER (de sus siglas en inglés, Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer), el Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) facilitado por la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio de los Estados Unidos (NASA), o el ALOS World 3D de la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón (JAXA). Sin embargo, su resolución no es suficiente para representar las características topográficas urbanas, incluidos edificios y redes de calles (K. Zhang, Tarquini, et al., 2019).

El desarrollo de tecnología LIDAR o la fotogrametría, permiten adquirir datos de mucha mayor calidad. Sin embargo, la mayoría de los servidores cartográficos ofrecen MDE basados en datos LIDAR ya que esta tecnología requiere menor mano de obra y tiempo para obtener datos a igualdad de precisión y coste económico que mediante técnicas fotogramétricas, lo que permite generar datos actualizados con mayor frecuencia. En España, el IGN incorporó al Plan Nacional de Ortografía Aérea esta tecnología en el año 2009, y la calidad de la cartografía ofrecida ha ido aumentando con su desarrollo. Las densidades de puntos de las primeras coberturas generadas fueron de 0.5 puntos/m² proporcionando datos con precisiones altimétricas de 40 cm de RMSEz. En la actualidad se encuentra disponible para casi todo el territorio nacional la 3ª cobertura formada por conjuntos de datos LIDAR de hasta 5 puntos/m² y 10 cm de RMSEz y MDE de 2x2 m de resolución (PNOA, 2023).

Otros autores (Jiang et al., 2020) han propuesto técnicas de mapeo basadas en redes neuronales para obtener MDE de alta precisión de zonas urbanas a partir de otros MDE de peor calidad, ya que los datos LIDAR no siempre están disponibles en países no avanzados. Concretamente en este trabajo, lograron restaurar MDE de 2, 4 y 8 m de resolución a modelos de 0.5 m de resolución equivalentes.

3.2. Modelado 3D de líneas eléctricas aéreas de alta tensión

El cartografiado digital de la red de líneas eléctricas aéreas y subterráneas aporta a las empresas propietarias de las líneas una herramienta sumamente eficaz para las tareas de gestión, mantenimiento y control de estas. No obstante, el acceso público a estos datos geospaciales es limitado. En España es posible consultar diversos mapas analógicos, como el correspondiente a al sistema eléctrico peninsular (Figura 3.3) o descargar de la página web del Instituto Geográfico Nacional (IGN) el mapa topográfico de España en formato vectorial a escala 1:25000 (MTN25) (<https://www.ign.es/web/resources/docs/IGNCnig/CBG%20-%20MTN25.pdf>) si bien los trazados de las líneas eléctricas tienen una precisión acorde a la escala nacional del plano, por lo que sus aplicaciones se encuentran limitadas.

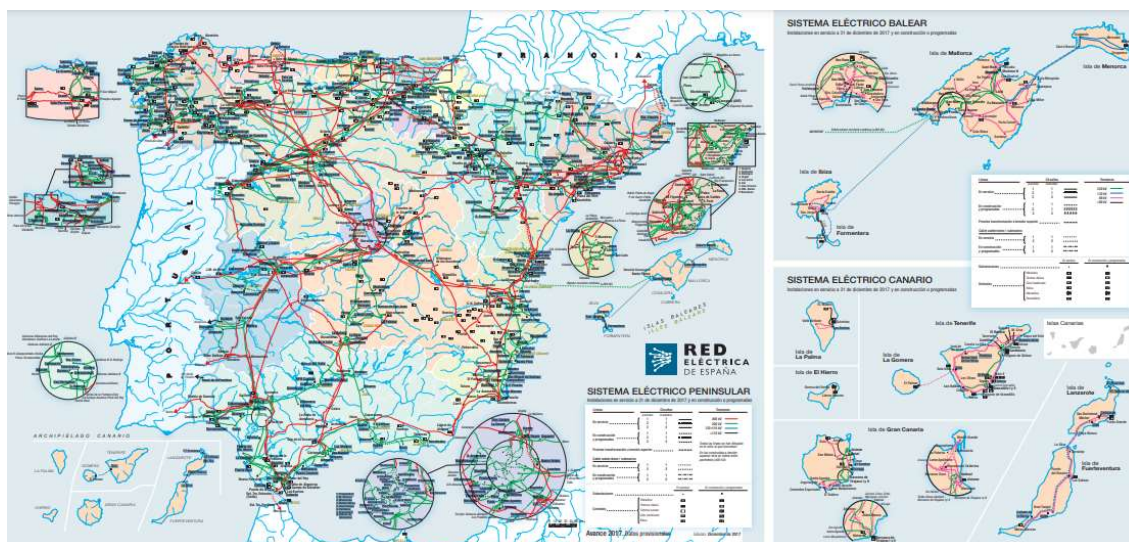


Figura 3. 3. Mapa del sistema eléctrico peninsular de España. Fuente: IGN, 2023

Recientemente, la Asociación de Operadores de Sistemas de Transmisión Mediterráneos para la Electricidad (Med-TSO) junto con la Red Europea de Operadores

de Sistemas de Transmisión Eléctrica (ENTSO-E) han publicado el primer mapa interactivo de las redes de transmisión de electricidad de ambas asociaciones (<https://www.entsoe.eu/data/map/#5.73/41.88/2.457>), si bien, tal y como indican en su página web de acceso (Figura 3.4), se trata de un mapa conceptual en el que las localizaciones de los elementos de la red no son precisos geográficamente ni siempre proporcionan información sobre parámetros elementales, como niveles de voltaje, longitud de ruta o número de circuitos, entre otros.

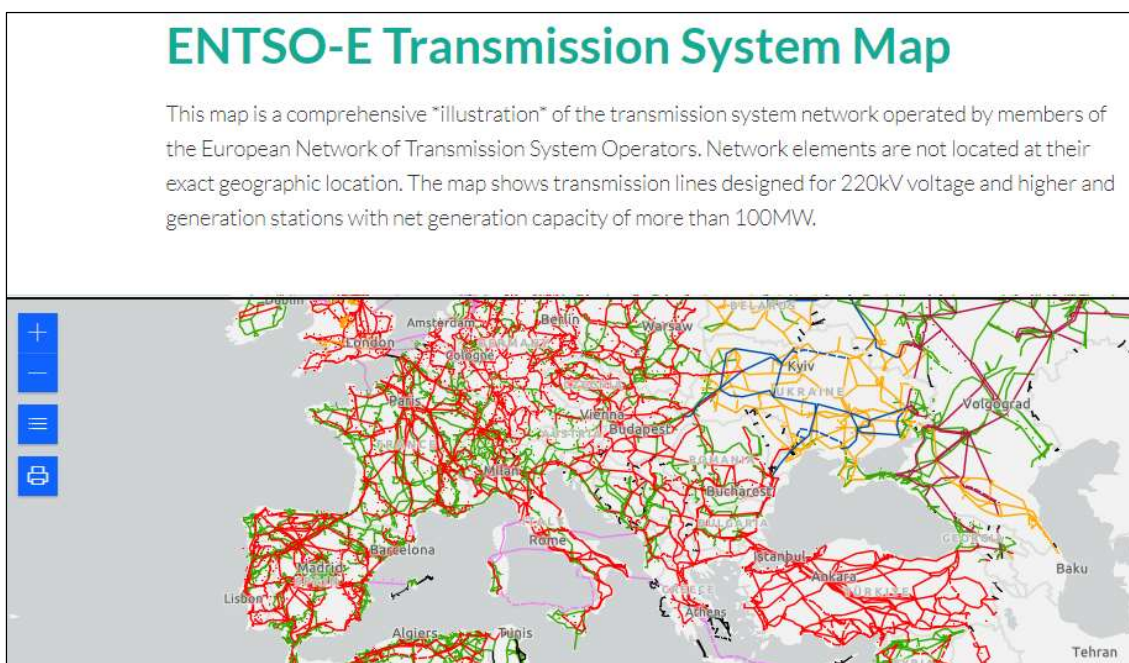


Figura 3. 4. Mapa interactivo de la red de transmisión mediterránea y europea. Fuente: ENTSO-E, 2023

También en EE. UU. el Subcomité de Datos a Nivel de la Fundación de Infraestructura Nacional (HIFLD, de sus siglas en inglés) promovió el desarrollo de una base de datos común con fines de visualización y análisis, por lo que es posible consultar y descargar la cartografía de su red eléctrica de líneas de transmisión en diversos formatos (<https://hub.arcgis.com/datasets/fedmaps::u-s-electric-power-transmission-lines/about>). Este conjunto de datos incluye también líneas eléctricas subterráneas, pero todos ellos se tratan de mapas informativos para los que no se requiere un nivel de precisión geográfica significativo (Figura 3.5).

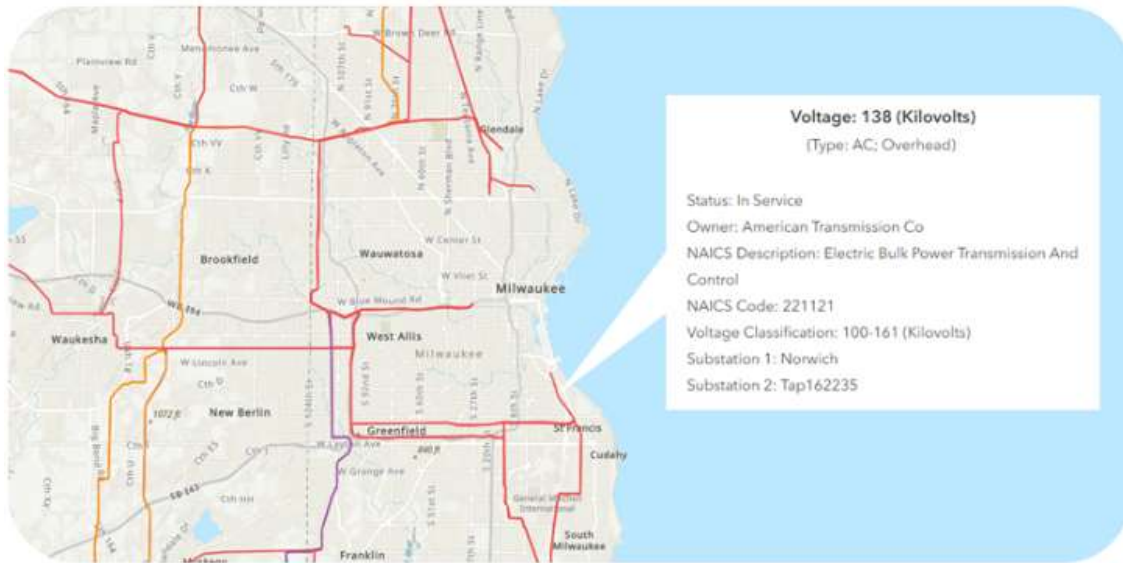


Figura 3. 5. Mapa interactivo de la red eléctrica nacional de EE. UU. Fuente: Esri U.S Federal Datasets, 2023

El desarrollo de bases geográficas detalladas sobre redes eléctricas a nivel nacional ha sido abordado por Eichhorn et al., (2018) . Estos investigadores, conscientes de la necesidad de poder disponer de datos públicos completos sobre las redes eléctricas nacionales que sean aplicables en áreas de investigación sobre el análisis de sistemas energéticos y en evaluaciones de impacto medioambiental, generaron una base de datos geográfica para la red eléctrica existente en la República Federal Alemana a partir de diversos paquetes de datos. Estos datos en su mayoría eran públicos si bien tuvieron que recurrir a otros de carácter privado pero que eran accesibles mediante pago. El proyecto se construyó sobre la plataforma OpenStreetMap. Su validación se llevó a cabo mediante un sistema de información geográfica y el conjunto de datos generado se encuentra disponible en formato vectorial.

Otra necesidad de disponer de cartografía no solo detallada, sino de alta precisión surge de las operaciones de mantenimiento de las líneas eléctricas, dirigidas a la detección de peligros por el posible contacto de los cables con la vegetación creciente en su entorno o al análisis de la estabilidad estructural de los apoyos. Estas tareas, que deben realizarse de forma periódica sobre miles de kilómetros de líneas eléctricas, no pueden resolverse

de forma íntegra a partir de cartografía bidimensional, incluso aunque esta tuviera un nivel de detalle importante. Tradicionalmente han sido llevadas a cabo mediante inspecciones de forma directa sobre las instalaciones, accediendo a ellas a pie o visualizándolas desde helicópteros, o de manera indirecta a partir de fotografías y vídeos. En ambos casos, estos trabajos consumen una cantidad de tiempo y recursos considerable para las compañías eléctricas. En los últimos años, el procesamiento de datos LIDAR para el mapeo 3D se ha definido como una solución para la optimización de estos trabajos (Matikainen et al., 2016).

Los métodos que han gozado de un mayor interés sobre la extracción de datos láser para el modelado digital de líneas eléctricas aéreas son el escaneo láser aerotransportado (ALS), mediante la instalación de sensores en vehículos aéreos tripulados o no (UAV), y el escaneo láser móvil (MLS) basado en la detección remota activa sobre vehículos terrestres. Estos métodos pueden proporcionar con mayor precisión las coordenadas espaciales de los objetos 3D de una línea eléctrica que mediante imágenes aéreas (R. Zhang et al., 2019).

Existen numerosos enfoques en la literatura científica para la reconstrucción de corredores de líneas eléctricas basados en ALS. Algunos autores (Awrangjeb, 2019) han destacado la importancia de utilizar la localización de los pilones a partir de la nube de puntos LIDAR. Ello permite definir una banda a lo largo de la línea eléctrica en un primer paso para posteriormente aislar de manera más eficiente los puntos correspondientes a la instalación de aquellos que le son ajenos (suelo, vegetación, etc.), lo que reduce de forma significativa la cantidad de datos a procesar. No obstante, en este trabajo el modelado de la línea eléctrica que obtienen se basa en una curva polinómica 3D en lugar de una curva catenaria, lo cual proponen como mejora.

La reconstrucción automática de líneas eléctricas como catenarias, incluso en trazados complejos, es abordada con éxito por Yoonseok & Gunho, (2012) cuyo modelado fue validado en un tramo de aproximadamente 600 km de una red eléctrica de California. Estas líneas fueron escaneadas mediante un sensor montado sobre un helicóptero que aportó una nube de puntos LIDAR de 24 puntos/m² de densidad. Esta validación solo contempló un tipo de torre eléctrica en concreto, faltando investigaciones

posteriores que verifiquen la robustez de su modelo con apoyos de diferentes características.

El modelado 3D de la catenaria, así como la diferenciación entre torres de suspensión y anclaje, incluso de otros elementos de la instalación (conductores de fase, conductores de tierra y cadenas) (Figura 3.6) fue realizado mediante un algoritmo propuesto por Ortega et al., (2019).

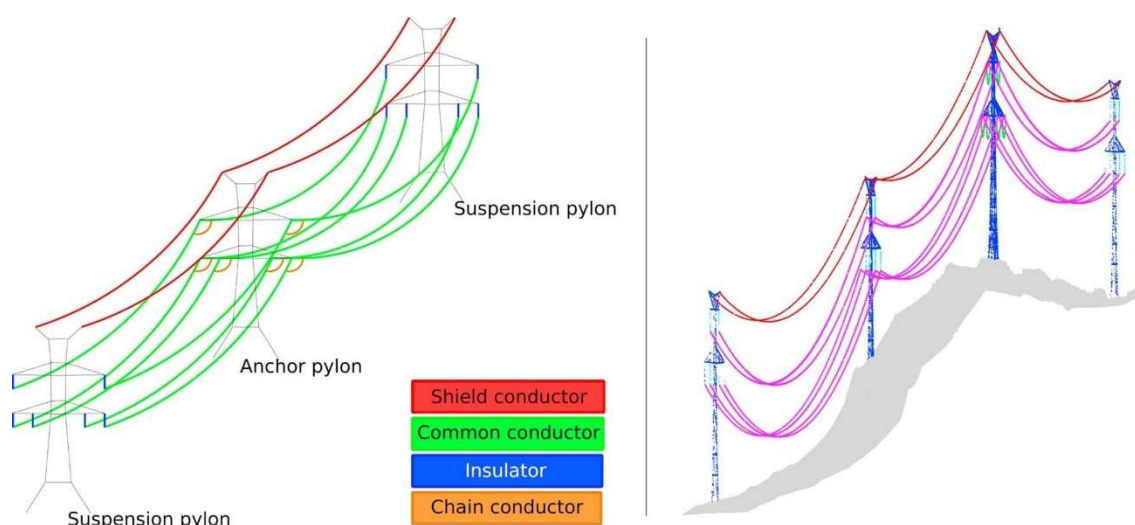


Figura 3. 6. Componentes de una línea eléctrica y tipos de apoyos y modelado con datos LIDAR. Fuente: Ortega et al., 2019

Este procedimiento asume densidades de puntos habituales en procedimientos ALS, que oscilan entre un mínimo de 10 puntos/m² para poder detectar los cables delgados y un máximo de 25 puntos/m² para que el volumen de datos sea manejable. No obstante, la validación de su propuesta la llevaron a cabo utilizando 48 nubes de puntos con una densidad promedio de entre 25.5 puntos/m² tomados sobre 80 km de diferentes tramos de la red eléctrica de España, y una anchura a cada lado del eje de 40 m. Obtuvieron clasificaciones correctas de los puntos para el 95% de los elementos y un RMSE promedio para el ajuste de la catenaria de 19.4 cm. La experimentación se llevó a cabo de forma íntegra mediante el programa MatLab si bien, los autores expresan que el proceso requiere mejoras basadas en la inclusión de técnicas de aprendizaje automático para facilitar la identificación de los diferentes elementos. Un modelado con un ajuste

aún más preciso de la catenaria ha sido reportado por Gu et al., (2017) con 5.5 cm de RMSE.

También se ha conseguido mediante el procesado de puntos láser la obtención de coordenadas horizontales precisas de las torres eléctricas, además de la identificación y modelado de los diferentes componentes de la línea eléctrica (R. Zhang et al., 2019) . El error medio cuadrático que obtuvieron en la posiciones planas X-Y de las torres eléctricas fueron inferiores a 0.25 m. El método automático propuesto se experimentó sobre una nube de puntos LIDAR de entre 4.2 y 30.7 puntos/m² de densidad, generada desde un helicóptero no tripulado volado sobre una zona con relieve variable. Se cartografiaron 34 km de una línea de 220 kV procesándola mediante un algoritmo en lenguaje de programación C++ sobre Microsoft Visual Studio 2013. Obtuvieron un éxito de identificación de los elementos de la línea eléctrica del 97%. El algoritmo propuesto presenta la potencialidad de mejorar la identificación de elementos circundantes a la línea como edificios y otros elementos urbanos, ya que permite el manejo eficiente de un volumen de datos considerable. En la Figura 3.7 puede observarse la reconstrucción del corredor de la línea eléctrica (imagen a), la localización de los puntos centrales de las torres (imágenes a y b) y un modelado 3D de la escena (imagen c) obtenidas de la zona experimental por los autores.

La extracción automática de líneas eléctricas en entornos urbanos presenta una especial dificultad en zonas urbanas complejas porque los cables pueden encontrarse muy próximos a edificios y árboles ubicados en las vías públicas. Wang et al., (2017), publicaron un algoritmo para una rápida extracción de los puntos LIDAR de nubes correspondientes a trazados de líneas eléctricas en áreas urbanas. Este fue testado sobre un conjunto de datos LIDAR aéreos de 3.4 puntos/m² de densidad, siendo esta relativamente baja ya que en estos tipos de estudios se puede alcanzar hasta 150 puntos/m². Utilizaron el programa informático Tiffs para el procesamiento de datos LIDAR y para generar un MDS, del que seleccionaron los puntos situados a 4 m sobre el suelo para obtener una criba de posibles puntos correspondientes a la LEAAT. La clasificación de los puntos pertenecientes a la línea eléctrica la realizaron mediante el programa matemático SVM, y obtuvieron una tasa de precisión, recuperación y calidad

de la clasificación superior al 98%, 98% y 97% respectivamente. Sin embargo, en este trabajo no se realizó ninguna reconstrucción 3D completa de las líneas eléctricas, sino que se limita a la identificación y a la clasificación de los puntos LIDAR.

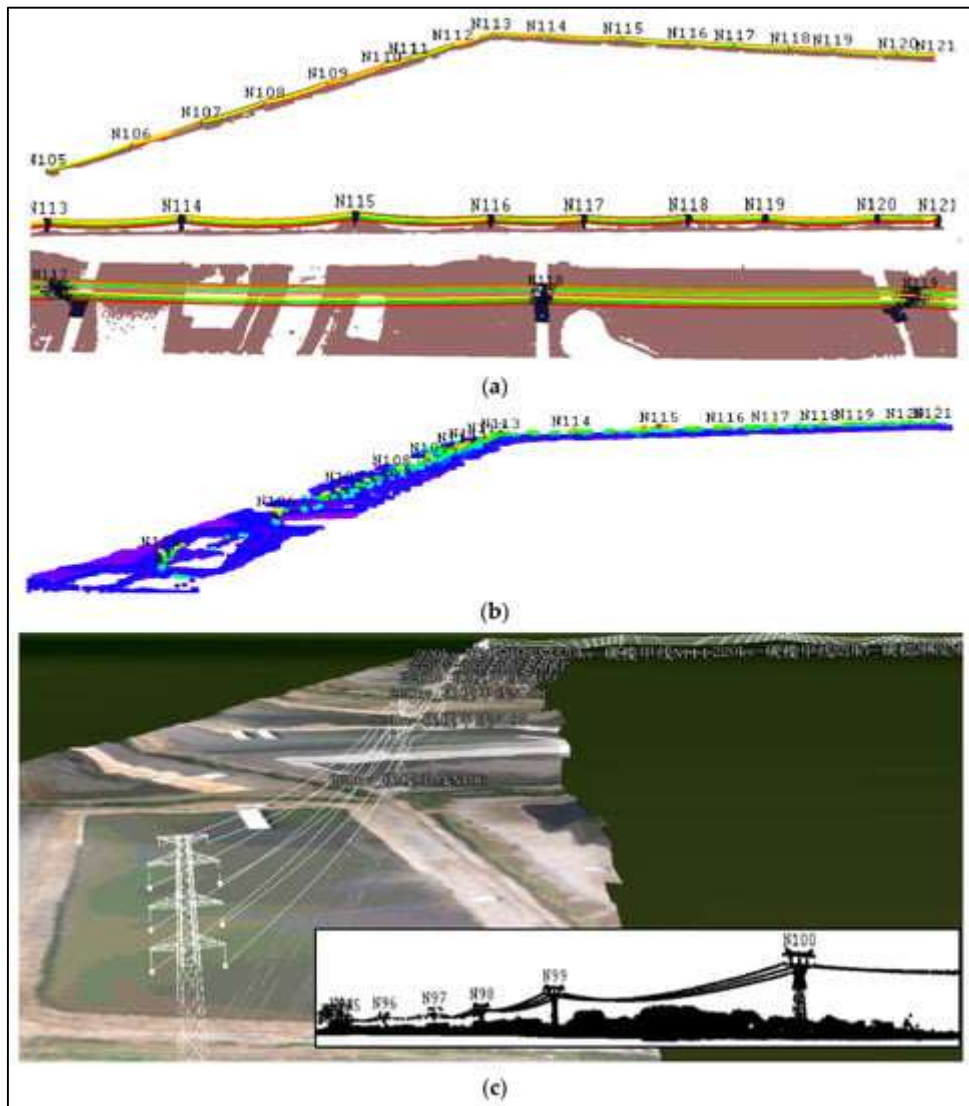


Figura 3. 7. Clasificación, posicionamiento y modelado de una línea eléctrica mediante datos LIDAR. Fuente: R. Zhang et al., 2019

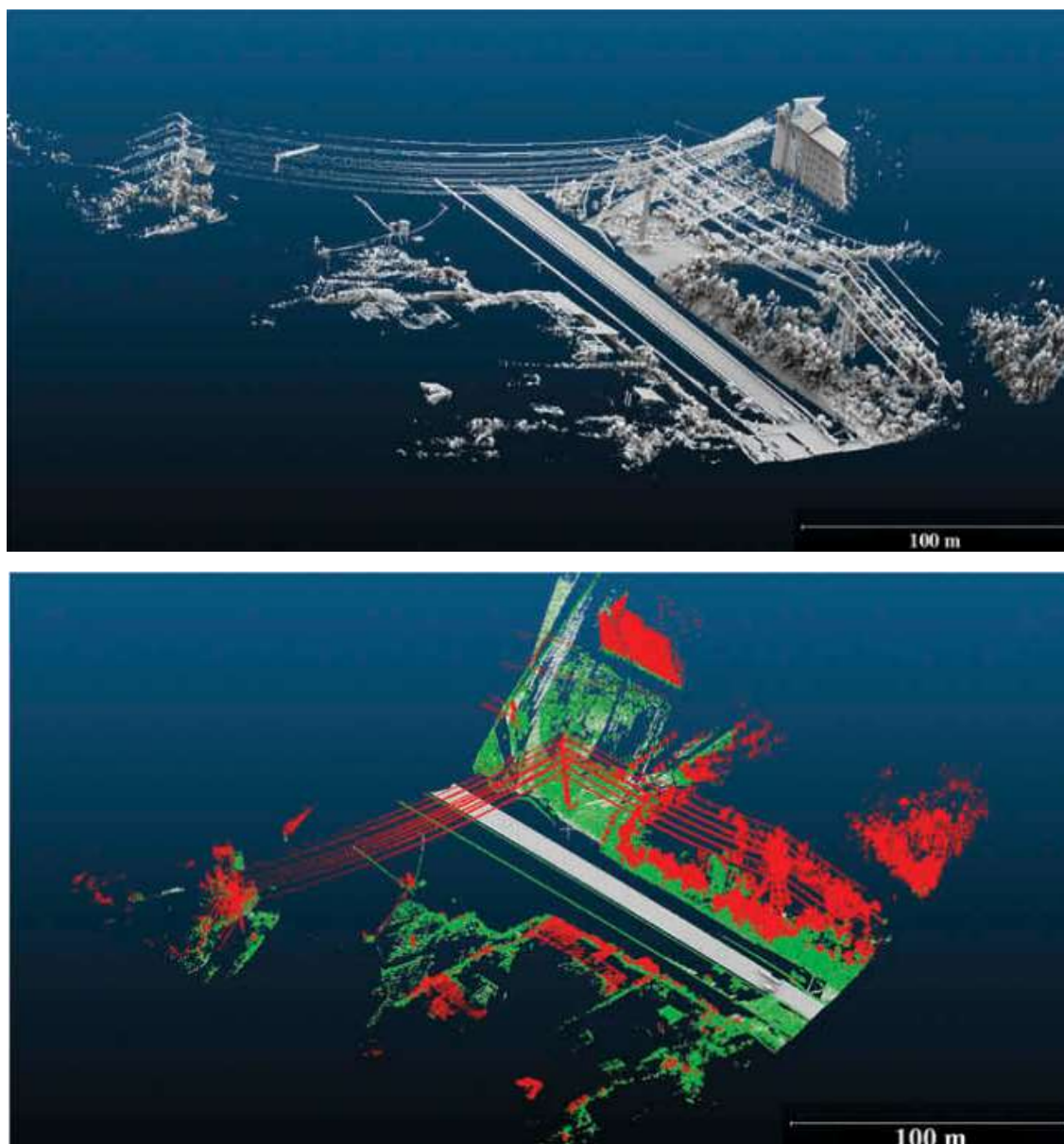
Es posible obtener representaciones gráficas más detalladas de las LEAAT incluso en entornos complejos cuando la extracción de datos se realiza mediante MLS. Este procedimiento de captura de datos aporta algunas ventajas sobre los procedimientos ALS (Lehtomäki et al., 2019):

- al poder operar más cerca de las líneas eléctricas y a nivel del suelo, puede capturar puntos LIDAR desde diferentes ángulos que los que los sistemas aéreos son capaces de proporcionar, aportando así una alternativa o incluso un complemento importante a estos,
- suponen también una herramienta especialmente útil para el escaneo de líneas en entornos urbanos, donde no siempre es posible el vuelo de UAV o helicópteros de forma segura y
- el costo económico es bastante inferior, ya que los sensores MLV pueden montarse sobre vehículos terrestres.

No obstante, su precisión de posicionamiento en sectores urbanos de edificios altos o dentro de parques urbanos puede ser peor, ya que los cañones viarios limitados por construcciones de gran altura o la cubierta vegetal pueden bloquear las señales de GNSS.

Cuando la cobertura satelital está garantizada se ha demostrado (Guan et al., 2016) que en entornos urbanos pueden alcanzarse precisiones posicionales en el modelado de la catenaria de los cables eléctricos con un 0.07 de RMSE utilizando nubes de punto obtenidas con un sensor LIDAR montado sobre un vehículo todoterreno. No obstante, uno de los principales inconvenientes de este trabajo fue el rendimiento computacional para el procesado del algoritmo, ya que tuvieron que manejar densidades de 286.44 puntos/m² para un escaneo de 180 m de líneas eléctricas. Otra limitación del algoritmo propuesto por estos autores radica en su parametrización según características estándar de las líneas eléctricas de la región de estudio que puede afectar a la sensibilidad del modelado cuando existan geometrías diferentes de las líneas. En la Figura 3.8 puede observarse en la imagen superior las nubes de punto procesadas y en la imagen inferior, la extracción de puntos pertenecientes a los cables y a las torres eléctricas.

Otros autores han investigado el modelado de LEAAT a partir de nubes de puntos tomadas en entornos de diferente complejidad, probando el algoritmo que proponen para la identificación de líneas eléctricas visibles desde viales urbanos, periurbanos y rurales, con densidades de puntos de 1670, 708 y 625 puntos/m² respectivamente. En la primera



*Figura 3. 8. Procesado de nube LIDAR en zona urbana para extracción de puntos de LEAAT.
Fuente: Guan et al., 2016*

zona, que reunía mayores factores de dificultad debidos principalmente a la existencia de ramas de árboles situadas delante de las líneas eléctricas o de fachadas de edificio muy próximas a las líneas, pudieron modelar los cerca de 200 m de la línea trifásica de referencia, y en la zona periurbana, rescataron la totalidad de 320 m de línea propuestos en esa zona, incluyendo para ambas situaciones aquellos tramos que se encontraban parcialmente ocluidos con promedios de exactitud del 98.84% (Yadav & Chousalkar, 2017).

Indiferentemente del método de captura de datos LIDAR y de los algoritmos aplicados para la identificación, extracción, clasificación y modelado de los datos correspondientes a la infraestructura eléctrica de interés, su representación gráfica para grandes longitudes de líneas eléctricas se encuentra limitada. Los trabajos presentados realizan las reconstrucciones tridimensionales de las líneas al objetivo de comprobar la adecuación de los modelos matemáticos propuestos.

Existen pocos trabajos del modelado de LEAAT en un sistema de información geográfica tridimensional (SIG 3D). Uno es el reportado por Yang et al., (2010). Estos autores desarrollaron una aplicación sobre el programa SIG SuperMap con el lenguaje de programación Visual Basic 6.0, que permitía obtener representaciones tridimensionales de escenas reales de LEAAT utilizando un MDE junto con imágenes de teledetección, y asociando a los diferentes componentes de la línea eléctrica sus atributos correspondientes.

La planificación y diseño de redes eléctricas también se ha investigado mediante SIG 3D, realizando una descomposición de los niveles en que debería estructurarse la arquitectura del sistema y proponiendo un flujo de trabajo de las operaciones necesarias para su creación (L. Zhang, 2021).

Otros autores (Y. Z. Zhang, 2008) consideran que los SIG 3D actuales no son suficientes para aportar una comprensión completa de estas instalaciones eléctricas, por lo que han incorporado la realidad virtual a un SIG 3D para mostrar más detalles de los objetos en una estructura multinivel de detalle (LOD, por sus siglas en inglés). De esta forma, integraron diversas capas de información sobre la plataforma Digital Earth que, dependiendo de la escala del zoom, permitían la visualización de manera totalmente realista los diferentes elementos estructurales de las LEAAT tales como cadenas de aisladores, anclajes, cables, etc.

Sin embargo, ninguna de estas aportaciones se encuentra enfocada a la realización de análisis espaciales tridimensionales, quedando replegadas sus potencialidades a navegaciones en modo de sobrevuelos o la representación de perfiles longitudinales de

los vanos (Figura 3.9), así como otras operaciones básicas de visualización y consulta de atributos de los elementos de la instalación.

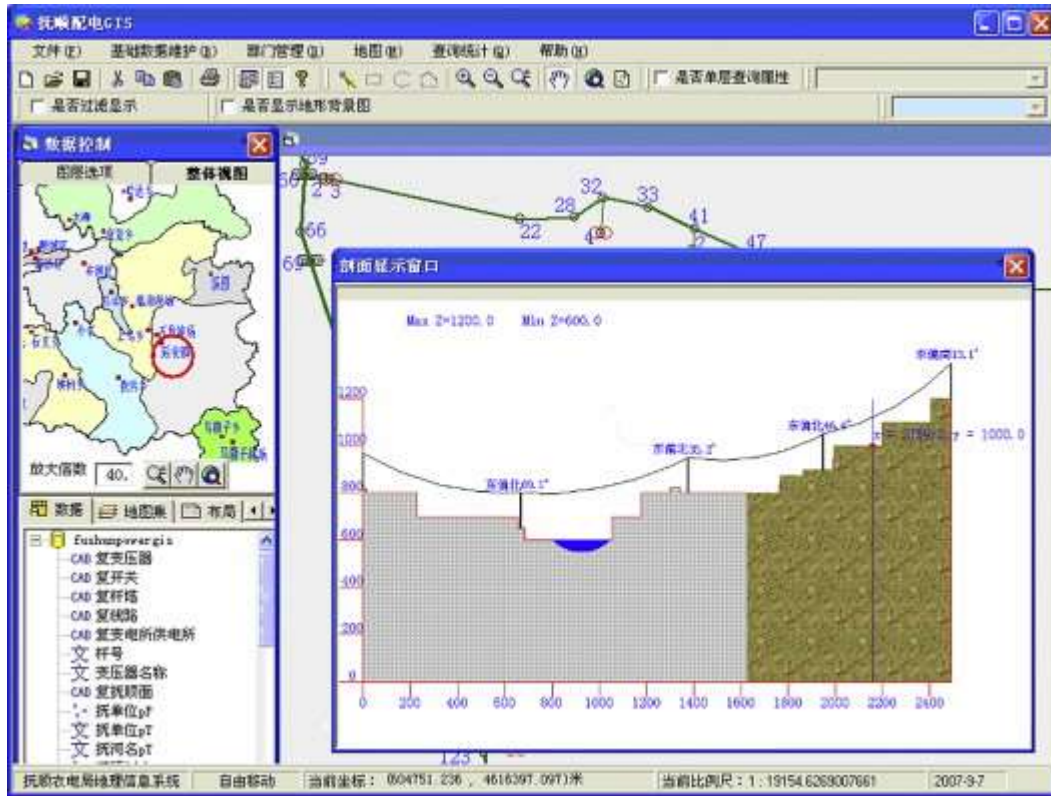


Figura 3. 9. Aplicación SIG 3D para la visualización y consulta de LEAAT. Fuente: Yang et al., 2010

La tecnología SIG tridimensional también se ha aplicado para la prueba de parámetros de funcionamiento (resistencia, capacitancia e inductancia) en el diseño de líneas de transmisión, que han reportado errores muy inferiores en las simulaciones que los generados por otros métodos tradicionales (Lin, 2023), pero tampoco han incorporado herramientas que permitan analizar la relación de las LEAAT con su entorno físico.

Los últimos desarrollos del programa informático ArcGIS en entornos 3D han permitido ir más allá de las soluciones enfocadas a las empresas del sector eléctrico para la gestión de sus infraestructuras a partir de cartografía bidimensional y en la actualidad incorporan el paquete de herramientas “3D Tools for Power lines”. Una de sus funciones permite la extracción de entidades de línea 3D de una nube de puntos LIDAR y su modelado ajustándolas a una curva catenaria. También permiten la clasificación de puntos

LIDAR según modelos integrados mediante aprendizaje profundo definidos por el usuario, de manera que este puede crear sus propias rutinas de identificación de puntos LIDAR para aplicarlos sobre otros conjuntos de puntos de características similares. Esta herramienta es aplicable tanto para líneas de transmisión como de distribución, habiendo obtenido resultados más fiables en la clasificación de estas últimas a pie de calle (ESRI, 2023). En la imagen inferior (Figura 3.10) se muestra el resultado de una clasificación de puntos LIDAR de las líneas eléctricas que atraviesan un barrio residencial.

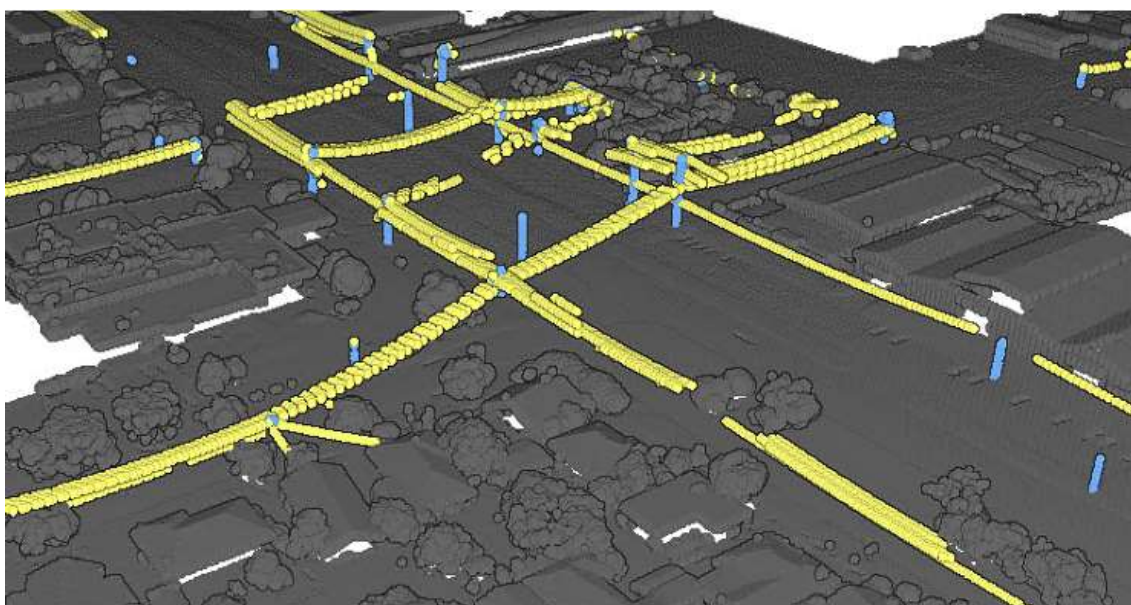


Figura 3. 10. Escena 3D a partir de puntos LIDAR y clasificación de los puntos correspondiente a las LEAAT (color amarillo) mediante ArcGIS. Fuente: ESRI., 2023

Además, las nuevas capacidades 3D de este SIG permiten representar las torres eléctricas y admite una amplia variedad de configuraciones de conductores. En la Figura 3.11 se muestran dos ejemplos de la capacidad de modelado de LEAAT en zonas urbanas mediante el programa ArcGIS Pro a los que puede accederse desde el visor “Scene Viewer Power Lines” (<https://www.arcgis.com/home/webscene/viewer.html?webscene=b0c573e17aef4a4c86d42a1907c4e2fa>). La primera de ellas muestra una red eléctrica de distribución en una zona urbana con una gran variedad de edificios y sobre un MDT de 5 m de resolución. La segunda imagen corresponde a un modelado de una línea eléctrica de alta tensión sujeta a torres eléctricas de celosía de acero atravesando una zona residencial de viviendas

unifamiliares, modelizadas también sobre un MDT de las mismas características que el ejemplo anterior.

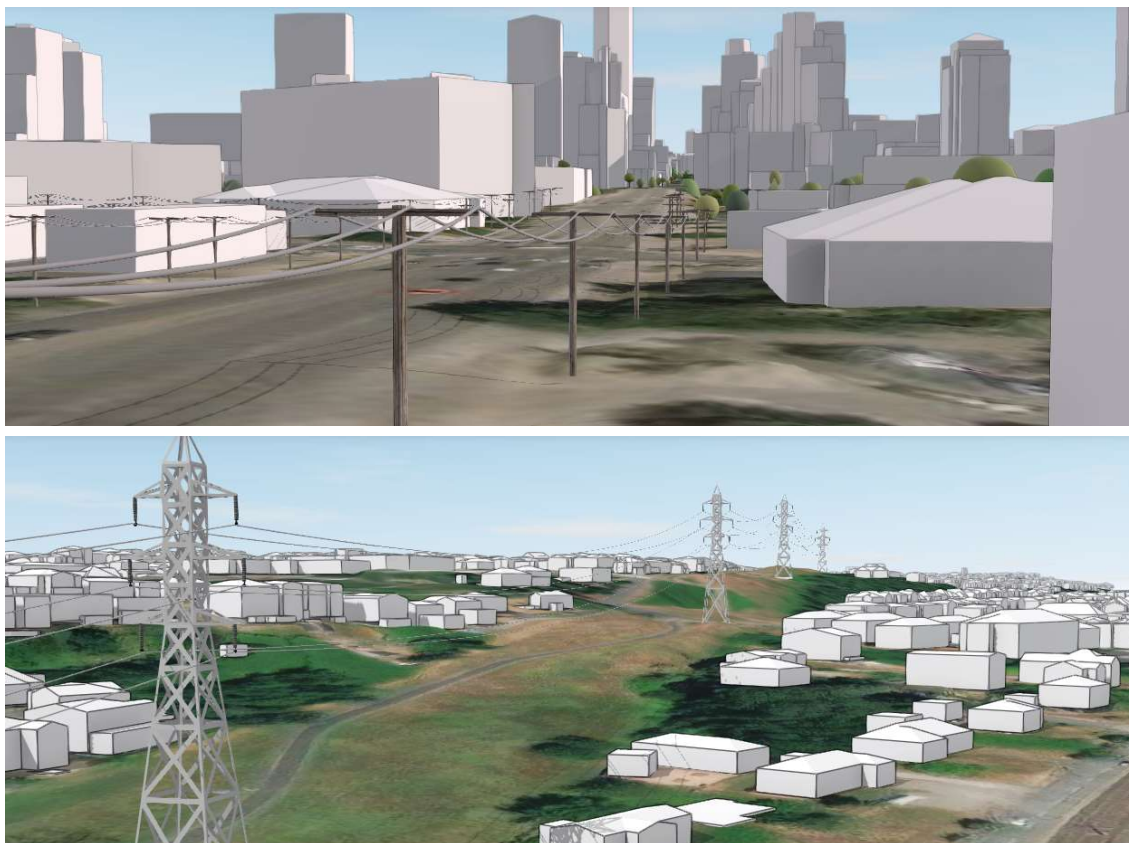


Figura 3. 11. Escenas 3D de LEAAT generadas mediante ArcGIS. Fuente: ESRI., 2023

Estos avances están permitiendo utilizar la tecnología SIG 3D dentro de programas informáticos para las tareas de inspección visual de líneas eléctricas (Quan et al., 2021). La generación de cartografía de LEAAT dentro de un sistema de información geográfica con fines de análisis 3D ha sido reportada en estudios de impacto paisajístico, lo que ha permitido el diseño de trazados de estas líneas lo menos visuales posibles para las poblaciones en su entorno (Fontani, 2017). Para estos estudios son considerados valores de elevación del terreno y de las torres eléctricas, si bien los tendidos eléctricos no son modelados tridimensionalmente, sin que el análisis paisajístico se lleva a cabo representando en 2D el trazado de la línea eléctrica cuya elevación se establece idéntica a las de sus apoyos.

También se ha utilizado una metodología SIG para estimar cuantos kilómetros de líneas eléctricas existen en el mundo (Kalt et al., 2021). Este trabajo se llevó a cabo extrayendo las longitudes de la red de transmisión a escala nacional de los datos SIG disponibles en OpenStreetMap (OSM) y de ESRI ArcGIS Hub utilizando el SIG de código abierto QGIS (Versión 3.12.1) e integrando además datos estadísticos sobre la longitud de las redes de transmisión de diversas instituciones nacionales y internacionales, como EURELECTRIC, Union of the Electricity Industry. Este trabajo revela la capacidad de los SIG para cartografiar redes eléctricas a escalas continentales o incluso globales si bien aún las representaciones gráficas en estas magnitudes territoriales se encuentran limitadas a 2D.

3.3. Modelado espacial de contaminantes ambientales mediante SIG

3.3.1. Principales funcionalidades de los SIG 2D en modelado ambiental

Cualquier factor medioambiental tiene lugar en un contexto espacial, por lo que el estudio de las relaciones entre estos y su entorno requiere información y análisis espacial. Por consiguiente, el modelado de cualquier agente físico o químico de interés en áreas urbanas requiere el procesamiento de datos muy diversos, como pueden ser datos de contaminación del aire, del agua, del suelo, ruido, gestión de residuos, radiación solar, campos electromagnéticos, temperatura, humedad, etc. así como de datos procedentes de GPS o sensores remotos.

Los Sistemas de Información Geográfica permiten la preparación de todos estos datos de entrada, su procesamiento, así como la visualización de todas las capas de información en forma de mapas digitales, ofreciendo una importante solución para los estudios de contaminación ambiental y estudios epidemiológicos relacionados con estos o con otros factores ambientales. Las aplicaciones SIG más habituales reportadas en estas disciplinas son:

- la geocodificación de ubicaciones donde se precisa conocer los niveles de contaminantes u otros fenómenos de interés,
- el cálculo de la distancia entre el emisor y el receptor,

- la integración de datos de monitoreo ambiental para la generación de mapas de las variables objetivo a partir de diversos modelos,
- y la evaluación multicriterio espacial.

De estas aplicaciones, la generación de modelos de simulación y el análisis multicriterio constituyen las dos funciones más características y potentes de los SIG, y los diferencian de otros sistemas de representación, como los basados en diseño asistido por ordenador (CAD) o en modelado de información de construcción (BIM). La generación de modelos permite obtener superficies continuas en formato ráster cuyas celdas representan un valor de la variable estudiada, como puede ser la elevación en los MDE, el nivel de ruido o los niveles de campo electromagnético. La obtención de estas superficies se lleva a cabo a partir de una muestra de valores medidos normalmente en ubicaciones situadas estratégicamente, ya que la obtención de valores para toda la extensión geográfica donde se estudia el fenómeno no resulta factible. Escogiendo y aplicando métodos de interpolación espacial adecuados sobre estas muestras, es posible obtener superficies capaces de predecir las concentraciones o magnitud del fenómeno en cuestión con significativa confiabilidad (Bosque Sendra, 1992). Existen diversos métodos de interpolación espacial, los cuales se agrupan en métodos determinísticos y métodos geoestadísticos.

Las técnicas deterministas utilizan funciones matemáticas para asignar valores a las diferentes ubicaciones a partir de los valores medidos en los puntos circundantes. Entre las herramientas de análisis de un SIG son habituales encontrar la ponderación de distancia inversa (IDW), interpolaciones polinómicas, funciones de base radial o interpolaciones con barreras siendo la primera de ellas de especial interés en estudios de contaminación ambiental (Bivand et al., 2013). El IDW supone que la influencia que tiene cada punto medido sobre los que se van a calcular disminuye linealmente con la distancia, otorgando un mayor peso a los puntos cercanos a la ubicación que a los más lejanos, siendo además este peso ponderable y direccionable. La ponderación se regula mediante un parámetro denominado potencia. Si a este factor se le asignara el valor cero, la influencia no se reduciría con la distancia y si se le asignara un valor muy alto, solo los

puntos que estuvieran situados muy próximos a los de la muestra se verían afectados por esta. Cuando la potencia sea igual al valor 2, entonces la influencia decae con el cuadrado de la distancia. En cuanto a la capacidad de direccionar dicha influencia, esta puede seguir la dirección del eje mayor de una elipse que represente el criterio de vecindad en lugar de un círculo, que sería útil para el estudio de contaminantes que dependan de la dirección del viento, haciendo coincidir este eje con dicha dirección. Otra característica particular del método IDW es que es un interpolador exacto por lo que la superficie resultante debe ajustarse forzosamente a los valores de la muestra, y proporciona resultados óptimos cuando esta es suficientemente densa respecto a la variación del fenómeno que se pretende modelizar.

Las técnicas de estadísticas geográficas y, particularmente, dentro de estas el método Kriging por ser ampliamente utilizado para la solución de problemas espaciales (Melo & Mora, 2022), permite además de predecir valores, evaluar la incertidumbre de las predicciones. Estas técnicas se basan en modelos que incluyen relaciones estadísticas entre los valores muestreados, concretamente, los pesos utilizados dependen de la autocorrelación espacial de los valores observados. A menor valor de la varianza de las estimaciones realizadas, mayor será el grado de confianza en los valores simulados. El Kriging ordinario solo tiene en cuenta los datos de la muestra de interés y obvia las covariables relacionadas que han sido obtenidas a partir de esta. Se utiliza con frecuencia cuando los datos de muestreo tienen una buena correlación en el sesgo direccional y/o la distancia espacial. Tanto el modelo de interpolación IDW como el Kriging ordinario realizan las predicciones basándose en una combinación lineal de los datos según la siguiente suma ponderada:

$$\hat{Z}(s_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(s_i) \quad i=1, \dots, n$$

Donde $\hat{Z}(s_0)$ es el valor a predecir en un punto s_0 interpolado, n es el número de observaciones que pesarán en la predicción viniendo dado este peso por λ_i sobre el punto observado $z(s_i)$ que se encontrará próximo al punto s_0 . La diferencia entre un método y otro estriba en la manera de obtener este peso, que en el método IDW se basa en la distancia y la ubicación de los puntos según su relación inversa de la distancia y en el

método Kriging, se considera además la distribución espacial general de los puntos medidos, por lo que λ_i dependerá de un modelo ajustado a los puntos observados, de la distancia al punto donde se quiere realizar la predicción y de las relaciones espaciales entre los valores observados alrededor de la ubicación de la predicción.

El método de Kriging con interferencia bayesiana, además de interpolar los datos mediante un proceso normal o gaussiano a partir de las covarianzas previas, utiliza el teorema de Bayes para actualizar el modelo de probabilidad conforme va ampliando el rango de datos del análisis. Estas técnicas de interpolación se usan especialmente en estudios de contaminación del suelo y de geología.

Este método Kriging, a diferencia del IDW que es muy sensible a los valores extremos, tiende a eliminar estos y cuando están presentes, tiende a producir menores errores de estimación y crear suavizados más generalizados. La obtención de superficies óptimas dependerá del uso del método de interpolación adecuado en función del número de observaciones que conforman la muestra y su distribución espacial (Rojas-Avellaneda, 2007).

Unas de las potencialidades más importantes de los SIG es el análisis multicriterio espacial (MCA). Mediante esta técnica es posible investigar la idoneidad de diferentes alternativas para un objetivo predefinido, para lo que se ponderan con diferentes pesos los factores que intervienen en el análisis, los cuales se representan individualmente mediante capas rasterizadas, y se combinan mediante álgebra de mapas para generar un mapa final representativo de dicha idoneidad.

3.3.2. Principales funcionalidades de los SIG 3D en modelado ambiental

Para que un SIG represente con precisión cualquier fenómeno sobre la superficie terrestre, la ubicación de los datos debe ser confiable y precisa (Falbo et al., 1991). El mundo es un espacio tridimensional por lo que los SIG 2D se encuentran limitados para reproducir la realidad tal y como es. Incluso cuando esta pueda conceptualizarse y representarse mediante una proyección bidimensional se está dificultando su comprensión especialmente de aquellos elementos ambientales en los que la tridimensionalidad influye en su comportamiento.

El rápido desarrollo de la tecnología, la disponibilidad de datos geoespaciales y el incremento de diseño de algoritmos matemáticos de modelos de simulación está permitiendo perfeccionar aún más las investigaciones basadas en SIG adoptando enfoques tridimensionales de la realidad. A diferencia de los métodos 2D, el análisis y modelado 3D de cualquier factor ambiental proporcionan resultados más realistas y completos en tres dimensiones espaciales, y una mejor comprensión de estos fenómenos gracias a representaciones más adecuadas y realistas de los mismos. En la actualidad es posible, además, integrarlos con modelados urbanos de cualquier complejidad lo que mejora aún más la interpretación de los resultados y la identificación de peligros potenciales.

Al igual que para los SIG 2D, dos de las características fundamentales que diferencian los SIG 3D de cualquier sistema CAD y de programas de cálculo científico con salidas visuales son el almacenamiento de atributos, que en este caso se produce en una base de datos tridimensional, y la estructura de datos, que ahora permite definir relaciones verticales además de las planas entre las diversas entidades que se representan. Las funciones particulares para operar y analizar estas relaciones en un contexto tridimensional son también exclusivas de esta nueva generación de SIG, que permite incorporar datos bidimensionales a un espacio tridimensional para redefinir su verdadera ubicación geográfica, así como crear las relaciones topológicas en la dimensión vertical.

En este contexto del desarrollo de investigaciones en entornos tridimensionales, entre las entidades clásicas para la representación de nuestro entorno en un SIG (datos vectoriales -puntos, líneas, y polígonos- y datos ráster -píxeles-) surge la entidad vóxel (ESRI, 2023) que se almacena en ficheros de formato netCDF (de sus siglas Formulario de Datos Comunes en Red, con extensión de archivos “*.nc”), que son archivos destinados principalmente a almacenar datos científicos de naturaleza tridimensional.

El vóxel representa el píxel volumétrico y se define como una unidad espacial volumétrica tridimensional de coordenadas (x, y, z) con su posición en un entorno SIG 3D. Esta entidad puede tener asociados diversos valores de atributos correspondientes a los fenómenos que se estén investigando (niveles de ruido, concentraciones de CO₂, etc.) así como información temporal. Este último atributo permite no sólo una definición

geográfica completa de cualquier variable, sino que permite su representación temporal en un marco cuatridimensional (espacio 3D y tiempo) inherente a la naturaleza de la distribución de cualquier contaminante o fenómeno ambiental.

En las imágenes inferiores (Figura 3.12) puede observarse la estructura de una capa vóxel, en la que la imagen de la izquierda cada unidad de volumen tiene asociado un valor de nivel o concentración, como presión isobárica, o H_2O . En las tres imágenes siguientes, cada vóxel también tiene asociado el tiempo como una cuarta dimensión además de sus coordenadas geográficas x,y,z .

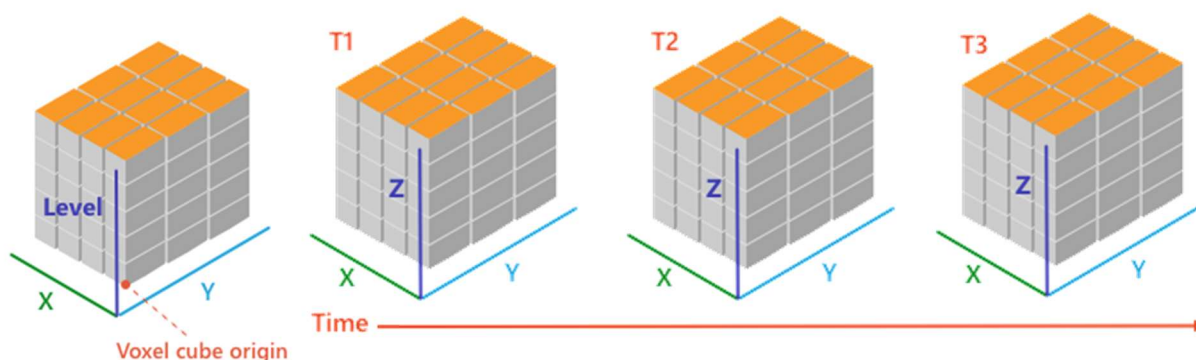


Figura 3. 12. Ejemplos de estructuras de capas vóxel. Fuente: ESRI., 2023

Las capas vóxel pueden abarcar grandes áreas (imagen superior de la Figura 3.13), pueden ser visualizadas como volúmenes o superficies, obtener secciones de estas para una mejor comprensión de zonas no accesibles como el subsuelo o generar isosuperficies a partir de las unidades de vóxel con idéntico valor (imagen inferior, Figura 3.13).

Esta nueva entidad ha permitido ir más allá de los análisis MCE tradicionales basados en SIG 2D, y desarrollar MCE 3D, facilitando así una nueva capacidad de análisis necesaria ya que muchos problemas espaciales del mundo real no pueden ser evaluados de forma adecuada en dos dimensiones espaciales (Munn & Dragičević, 2021). Estos autores desarrollaron un método de análisis multicriterio espacial 3D para clasificar diferentes viviendas según su idoneidad para diferentes tipologías de usuarios en función de la afectación de ruido, de la contaminación por tráfico, luz solar que recibe, vistas paisajísticas, etc. Para ello establecieron un análisis multicriterio para la clasificación de

los vóxeles en los que se habían descompuesto diez edificios residenciales de gran altura en un área urbana densa de la ciudad de Vancouver (Canadá).

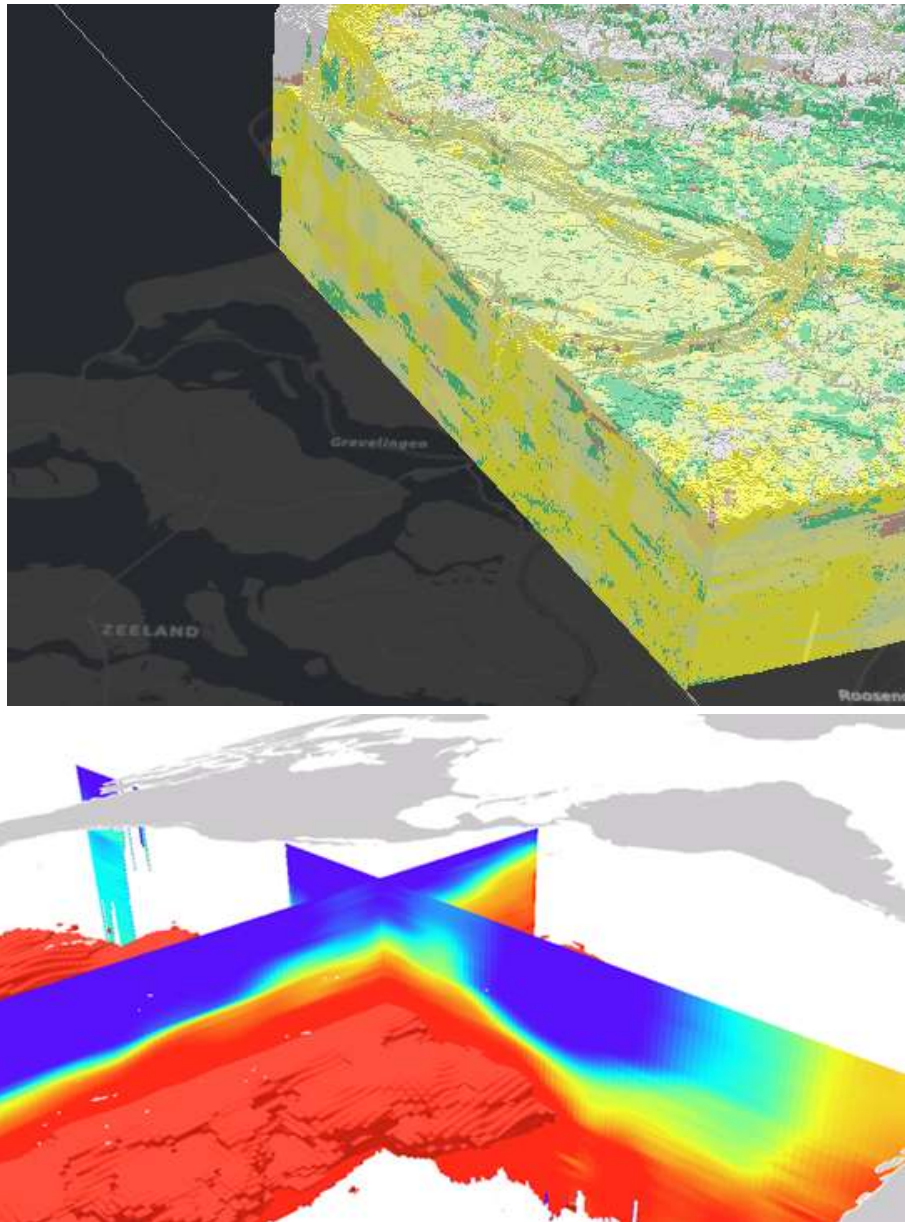


Figura 3. 13. Capa vóxel del Servicio Geológico de los Países Bajos (imagen superior) y capa marina de saturación de oxígeno con sección transversal e isosuperficies. Fuente: ESRI., 2023

La implementación de este nuevo enfoque de MCE 3D se implementó utilizando ArcGIS 10.7.1 y el CityEngine 2019. Mediante el primer programa informático determinaron criterios de proximidad espacial 2D, la radiación solar y las cuencas visuales, mientras que con el segundo se realizó el procedimiento de “voxelización”, así

como el cálculo de criterios 3D y el análisis de idoneidad, siendo necesario para estas tareas tridimensionales la programación de las herramientas en el lenguaje propio de CityEngine denominado Arquitectura Generada por Computadora (CGA). En la Figura 3.14 se muestran los resultados de tres análisis de idoneidad, según diferentes criterios (a- adecuación para familias; b- adecuación para personas mayores; c- adecuación para jóvenes profesionales solteros).

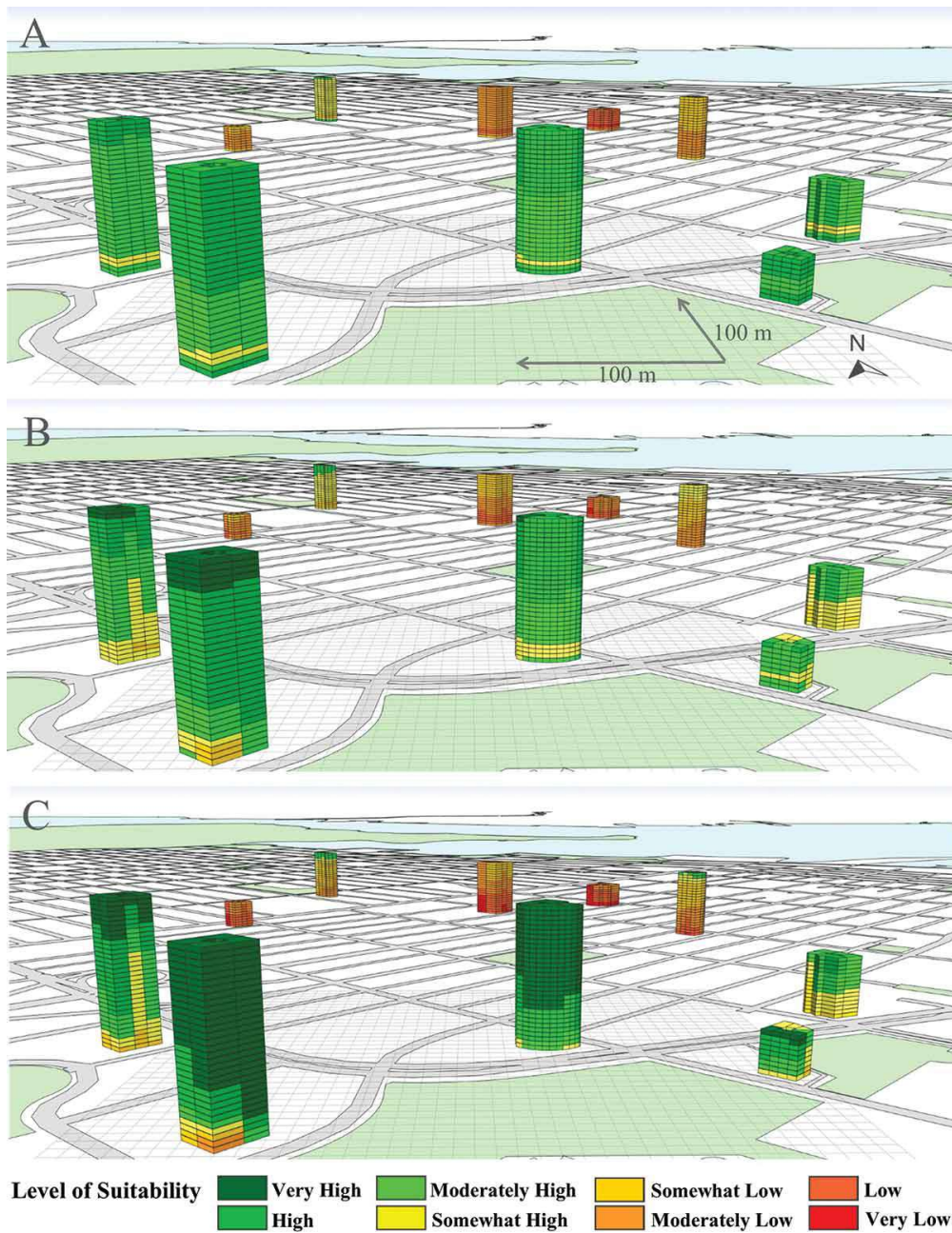


Figura 3. 14. Resultados de análisis multicriterio espacial 3D para residentes de edificios.
Fuente: Munn & Dragičević, 2021

Además de los análisis multicriterio 3D para la generación de mapas, como se ha visto anteriormente, la interpolación espacial es una herramienta fundamental que también ha debido adaptarse a las necesidades de modelado 3D. El programa informático ArcGIS Pro ha incorporado a su paquete de herramientas de interpolación un modelo 3D de kriging bayesiano empírico. Sin embargo, para poder aplicar otros métodos estadísticos 3D como el kriging ordinario y métodos deterministas de interpolación 3D, algunos autores (Luboš et al., 2006) han tenido que implementarlos mediante una aplicación externa que se utilizó como una extensión en el programa ArcGIS.

De esta manera pudieron calcular para diferentes alturas las concentraciones de ozono en cruces de carreteras en un área urbana, representando mediante volúmenes 3D estos niveles de contaminación (Figura 3.15).



Figura 3. 15. Mapa 3D de niveles de concentración de ozono a 300 m sobre el suelo en los cruces de carreteras en la ciudad de Praga. Fuente: Lubos et al., 2006

También se han utilizado los SIG 3D en etapas posteriores a la interpolación de datos, para la visualización de los resultados obtenidos y/o para análisis espaciales complejos (Ou, 2011). Concretamente, se generó un mapa 3D de contaminación del aire mediante el método de interpolación Marching Cubes, que se trata de un algoritmo para renderizado de volúmenes (Lorensen & Cline, 1987) que fue desarrollado para el procesado de imágenes médicas. Mediante la plataforma ArcGIS crearon una simulación dinámica en función del tiempo de la dispersión de la contaminación con un control de tiempo integrado en dicho programa y mediante las herramientas de análisis espacial 3D pudo obtener datos de máximos de contaminación, así como la cantidad de población demográfica afectada.

La interpolación 3D de kriging ordinario también se ha aplicado en estudios de contaminación de suelos en un entorno de visualización 3D basado en cuadrículas de diferencias finitas (FGD, de sus siglas en inglés) (Ren et al., 2016), pero los resultados no son integrables en un SIG.

Aplicando el mismo método Campos Piedade et al., (2014) programaron un código interoperable con el programa GRASS GIS para realizar interpolaciones tridimensionales a partir de datos de muestras de concentraciones de plomo en el suelo distribuidos en 57 ubicaciones en 3 capas cada muestra. La función de interpolación 3D se basó en el método determinista spline. Este método presenta la particularidad de imponer que la superficie pase exactamente por los puntos muestreados obteniendo para esta una curvatura general muy suave, por lo que está muy indicado para simular variables que presenten variaciones muy leves. Los resultados se representaron mediante una superficie volumétrica en el programa de visualización científica Paraview (Kitware Inc) pero nuevamente fuera de un entorno SIG.

No obstante, la interpolación 3D no siempre es necesaria para obtener representaciones tridimensionales de una magnitud física o ambiental. Es habitual encontrar trabajos en los que las predicciones se realizan mediante interpolaciones 2D que posteriormente son ajustadas sobre un MDE para obtener representaciones más realistas e integrarlas en su entorno también modelado tridimensionalmente. Es el caso del trabajo presentado por Dubey et al., (2022) sobre un sistema de mapeo de ruido que

permitió representar una superficie de niveles de ruido que obtuvieron ajustada a un MDS (Figura 3.16). Los gradientes de colores a nivel de calle y sobre la fachada de los edificios clasifica el nivel de exposición al ruido en cualquier punto del entorno urbano. El efecto de atenuación del ruido conforme en zonas cada vez más alejadas de la rotonda viaria se observa claramente. También el modelado obtenido permite conocer el grado de afectación de los diferentes edificios, si bien la representación de la superficie de ruido corresponde a una cota de elevación del terreno concreta y aunque se haya ajustado a la representación del terreno y de los edificios no corresponde al nivel de ruido que, por ejemplo, tendría lugar en las viviendas situadas más altas. No obstante, esto podría solucionarse generando superficies de ruido para diferentes cotas y ajustando su visualización para ese valor de elevación que haya sido considerado.

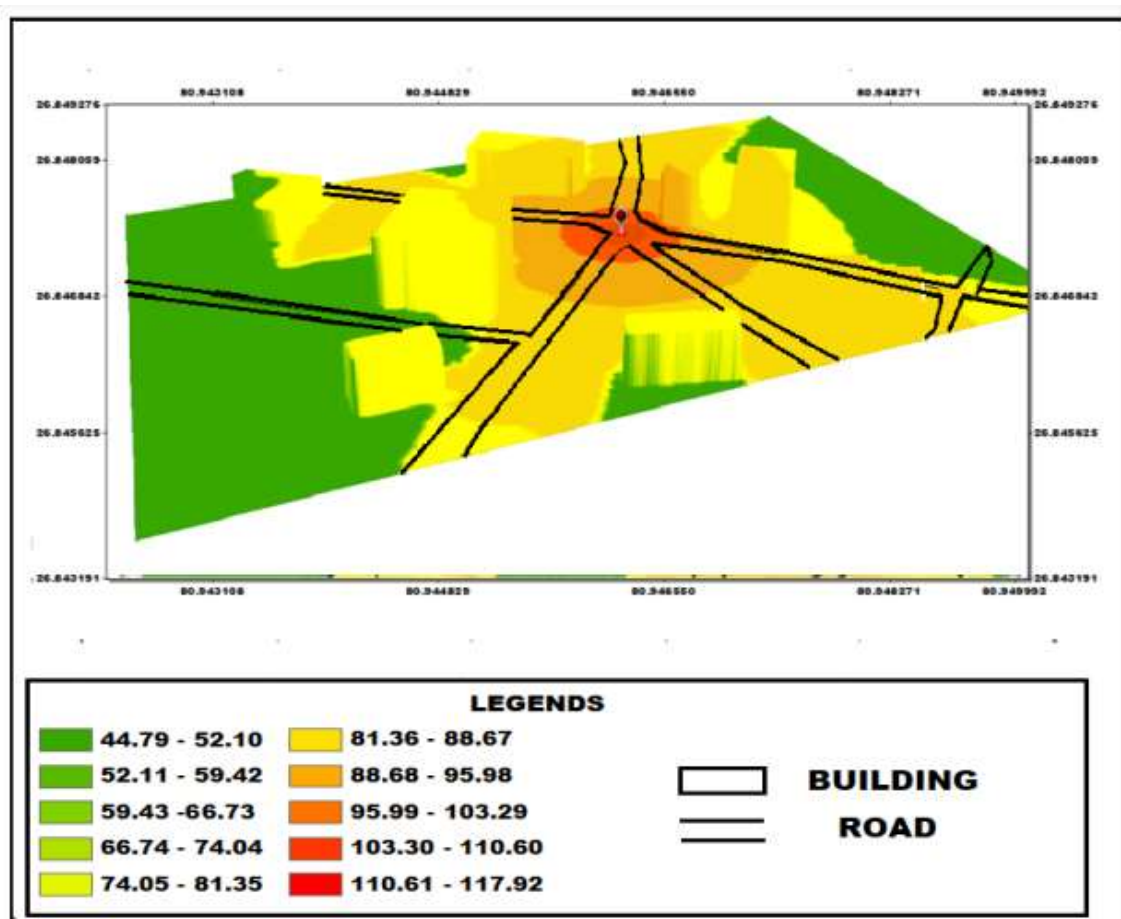


Figura 3. 16. Mapa de ruido ajustado sobre un MDS. Fuente: Dubey et al., 2022

Otros autores (Wong et al., 2009) han generado visualizaciones 3D temporales mediante aplicaciones integradas en ArcScene (visualizador 3D del paquete ArcGIS). Los modelados 3D (Figura 3.17) se obtuvieron extrusionando como volúmenes las superficies planas de la variable de interés, las cuales fueron obtenidas mediante la interpolación de datos observados de contaminación atmosférica rescatados en tiempo real de un servidor de datos público. Las gráficas adjuntas a las imágenes indican el momento temporal en que se rescataron las mediciones de los contaminantes ambientales y que corresponden a los modelados obtenidos.

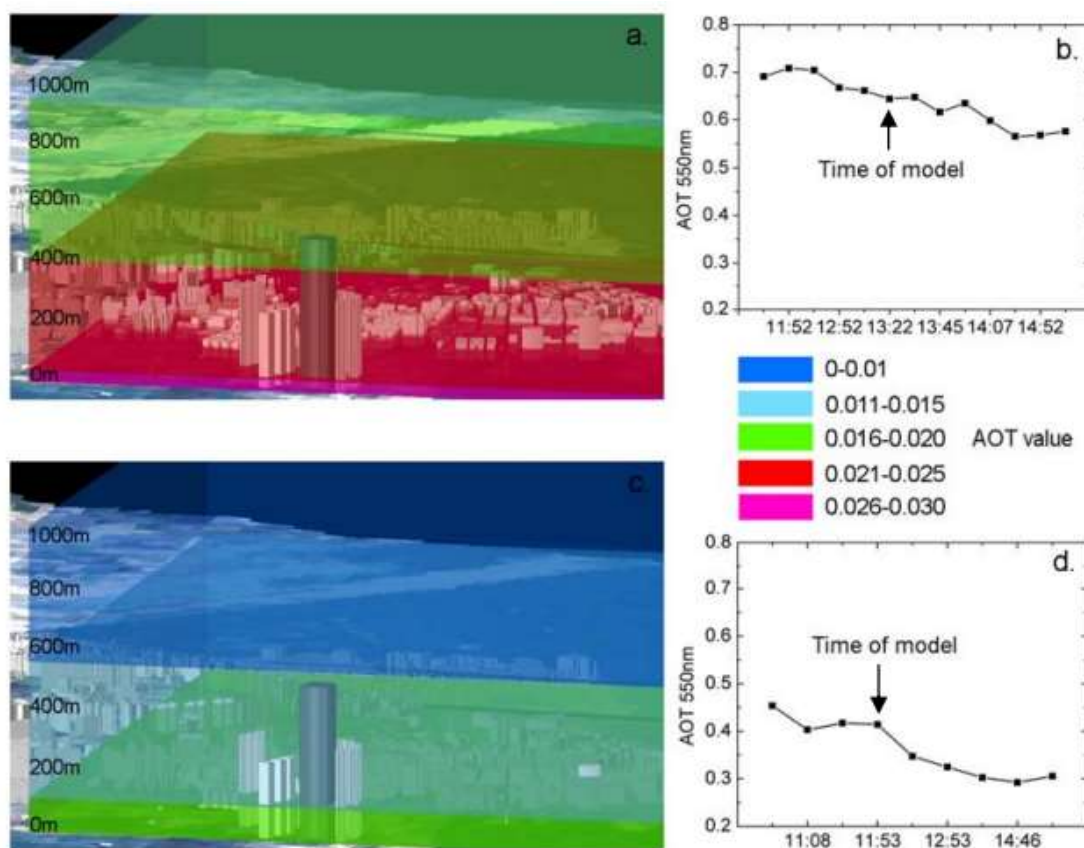


Figura 3. 17. Serie temporal de mapas 3D de aerosoles mediante SIG 3D. Fuente: Wong et al., 2009

La necesidad cada vez mayor de la comunidad científica de manejar, analizar y visualizar datos tridimensionales también está potenciando proyectos de investigación para la generación de SIG de código abierto si bien en la actualidad sus capacidades son limitadas (Scianna & Ammoscato, 2010).

3.4. Conclusiones del capítulo

En la actualidad los organismos públicos están impulsando y facilitando la disponibilidad gratuita de datos geográficos de alta calidad, siendo los datos LIDAR uno de estos productos esenciales a partir de los cuales es posible obtener modelados de alta calidad y precisión de nuestro entorno, como por ejemplo los MDE, que constituyen la base de numerosas investigaciones científicas.

Los avances tecnológicos están permitiendo a partir de estos datos modelar infraestructuras complejas y de mínimo grosor como son las líneas eléctricas aéreas, incluso en entornos urbanos. Cada vez existen algoritmos de clasificación de puntos LIDAR para el modelado de LEAAT más precisos y eficientes, y la nueva generación de SIG 3D permite, cuando los datos requeridos están disponibles, no sólo su adecuada clasificación para definir las LEAAT sino también su modelado y la realización de análisis espaciales con su entorno, al definir las LEAAT como entidades espaciales con características y topología 3D. No obstante, esta tarea requiere datos LIDAR de elevada densidad (aproximadamente 10 puntos/m²) para que los puntos correspondientes a estas instalaciones puedan ser clasificados, los cuales aún no están disponibles para el público en general y deben obtenerse de forma privada, lo que supone un elevado coste económico. En España, por ejemplo, el PNOA permite la descarga de nubes de puntos LIDAR de un máximo de 2 puntos/m². Sin embargo, estas densidades si permiten obtener MDE de alta precisión de los que derivar modelados altamente precisos y realistas.

Además, los SIG 3D se están mostrando como una herramienta capaz de modelar en 3D no sólo elementos antropogénicos o el relieve del terreno, sino también factores ambientales aportando así una mejor comprensión de su distribución e interacción del entorno siendo un factor determinante en la confiabilidad de estos modelados el método de interpolación aplicado a la muestra de datos a partir de la cual se genera. Por tanto, las conclusiones de este capítulo refuerzan la tesis de que los SIG pueden constituir una base eficaz para la representación y el análisis espacial del CM generado por LEAAT en nuestro entorno.

4. METODOLOGÍAS PARA LA ESTIMACIÓN DE LA EXPOSICIÓN RESIDENCIAL A CM FEB. APLICACIONES DE LOS SIG

4.1. La exposición residencial a CM FEB

4.1.1. Definición de la exposición

Toda la población se encuentra expuesta en mayor o menor grado a campos electromagnéticos, ya que estos se encuentran habitualmente en nuestro entorno y pueden ser producidos por fuentes naturales o artificiales.

El campo geomagnético es una de las principales fuentes naturales de origen natural al que estamos continuamente expuestos. Otros ejemplos son los campos eléctricos que se producen por la acumulación de cargas eléctricas en la atmósfera debidas a las tormentas o los campos electromagnéticos súbitos que se generan como consecuencia de los rayos. El campo magnético terrestre se considera estático, y aunque está sujeto a variaciones diurnas, estacionales y por procesos ionosféricos, los valores habituales de exposición se encuentran en torno a 45 μT , si bien en los polos pueden alcanzarse valores máximos de 60 μT y en zonas ecuatoriales, puede llegar a caer a 24 μT . La intensidad del campo eléctrico es menor en las zonas polares y más alto en latitudes templadas. También pueden existir fuentes de campo magnético estáticos artificiales que se sumen vectorialmente al geoestático, como los causados por las líneas eléctricas de alta tensión de corriente continua (H. M. Repacholi & Greenebaum, 1999).

Las fuentes de campos electromagnéticos creadas por el hombre son la primera causa de exposición de las personas a campos variables en el tiempo, y para frecuencias de 50-60 Hz, pueden llegar a ser muy superiores a los de origen natural. El uso intensivo de la electricidad en todas las facetas de nuestras actividades cotidianas es la principal responsable de la exposición y, dependiendo el entorno que se analice en los estudios epidemiológicos, se puede diferenciar entre exposición ocupacional y residencial.

En el entorno laboral, los CM pueden provenir de diversos aparatos de trabajo, como máquinas de resonancia magnética, equipos de soldadura, fotocopiadoras o

computadoras personales. En los hogares, las principales fuentes de CM son las derivadas de los electrodomésticos (secadores de pelo, microondas, aspiradoras, etc.), del cableado de la casa y de instalaciones eléctricas principales cercanas, como subestaciones o líneas eléctricas aéreas y/o subterráneas.

En una línea eléctrica de transmisión o distribución, las corrientes desequilibradas resultantes por la desviaciones de corrientes de los conductores neutros dan lugar a un campo magnético residual. Este campo tiene lugar tanto dentro como fuera de las casas y genera lo que se denomina exposición de fondo, la cual ha sido objeto de un gran número de estudios (Swanson & Kaune, 1999). Estos autores encontraron valores promedios de fondo de 0.11 μT en Estados Unidos y Europa, mientras que en el Reino Unido los valores encontrados han sido más bajos con niveles de 0.05 μT (IARC, 2002; Schüz et al., 2016).

En el interior de las viviendas, el CM que generan los electrodomésticos pueden superar de forma notable a los de una línea eléctrica de transmisión. En la Tabla 4.1 se muestran los niveles de CM generados por los electrodomésticos más habituales.

Aparato eléctrico	Intensidad del campo magnético (μT) a 3 cm de distancia	Intensidad del campo magnético (μT) a 1 m de distancia
Secador de pelo	6-2000	0.01-0.03
Afeitadora eléctrica	15-1500	0.01-0.03
Aspiradora	200-800	0.01-0.03
Horno microondas	73-200	0.25-0.6
Lavadora	0.8-50	0.01-0.15
Lavavajillas	3.5-20	0.07-0.3
Frigorífico	0.5-1.7	<0.01
Ordenador	0.5-30	<0.01
Televisor	2.5-50	<0.01
Videoconsola	0.5	<0.01

Tabla 4. 1. Valores habituales de campo magnético generado por diversos electrodomésticos.
Fuente: adaptada de EPRI, 2023

Sin embargo, las exposiciones a estos aparatos suelen ser puntuales y muy cortas y normalmente a una distancia de 1 metro a los mismos, los campos magnéticos que generan estos aparatos caen a valores de fondo. Algunos electrodomésticos que generan mayores CM son los abrelatas eléctricos (145 μT) y las batidoras de mano (77 μT).

El CM generado por una línea eléctrica también disminuye con la distancia a la misma, pero a diferencia del campo generado por los electrodomésticos, es mucho más constante en el tiempo y afecta a toda la casa. Se han hecho mediciones de niveles de CM para estudios epidemiológicos en diferentes países siendo Alemania y Nueva Zelanda donde se registraron los valores más bajos con 26 ηT , seguido de Reino Unido con rangos de exposición doméstica de 29-67 ηT y Suecia de 37-48 ηT , siendo Canadá donde se registraron los valores de CM residenciales máximos con 48-107 ηT (WHO, 2007). Si bien los valores promedios de intensidad del campo magnético en los hogares son muy inferiores a niveles de CM dañinos constatados científicamente, la preocupación de la población en general estriba en si la exposición a largo plazo, aunque sea a valores de campos relativamente bajos, pueden causar daños en la salud. Es por ello que la exposición a los CM de los electrodomésticos y de las líneas eléctricas es investigada de forma separada, siendo estas últimas las que han presentado una mayor atención de la comunidad científica. No obstante, las líneas eléctricas de transmisión de alto voltaje no son la principal fuente de exposición de la población común, sino las líneas de distribución de medio o bajo voltaje (Bracken et al., 1993; Merchant et al., 1994). Algunos valores típicos para estas líneas se muestran en la tabla inferior (Tabla 4.2) y puede encontrarse un estudio detallado en Swanson & Kaune, (1999).

Voltaje de la LEAAT	Intensidad del campo magnético (μT) debajo de los conductores	Intensidad del campo magnético (μT) a 30 m del eje de la línea	Intensidad del campo magnético (μT) a 100 m del eje de la línea
Línea de 220 kV	1-12	0.1-2	<0.3
Línea de 400 kV	1-25	0.2-3	<0.4

Tabla 4. 2. Valores habituales de campo magnético generado por LEAAT. Fuente: adaptada de IARC, 2002

Estos valores presentan una alta concordancia con los publicados por el grupo de trabajo FEMU (FEMU, 2024) donde recopilan y actualizan valores habituales de exposición registrados en la literatura científica.

En otro estudio llevado a cabo en el norte de España (Garrido et al., 2003), también se midieron los niveles de CM para diferentes líneas de 132 kV (por ser estas las más habituales). Los mayores valores obtenidos fueron de 7.5 μT en el centro una línea de simple circuito horizontal. Mediante simulación calcularon los valores de CM para plena carga y diferentes configuraciones de líneas, y obtuvieron niveles máximos de CM entre 2.7 y 12 μT . En la imagen inferior (Figura 4.1) se muestran los valores calculados y medidos según intensidades de funcionamiento habituales de 91 A y 104 A en cada circuito de una línea doble.

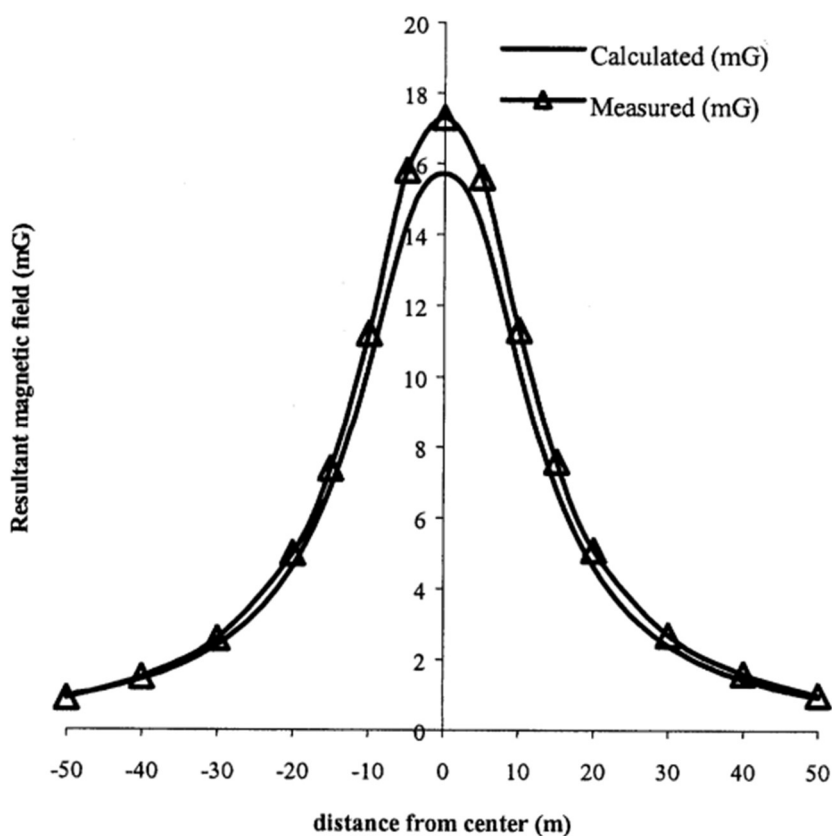


Figura 4. 1. Niveles de CM medidos y calculados en una línea de doble circuito en España.
Fuente: Garrido et al., 2003

Para las líneas eléctricas, algunos análisis en conjunto han determinado cierta prevalencia de leucemia infantil para umbrales de exposición residencial de 0.3-0.4 μT (Ahlbom et al., 2000; Greenland et al., 2000; Kheifets et al., 2010) si bien son pocos los hogares que presentan estos niveles de CM e incluso la exposición a CM de la población residente en las proximidades de LEAAT difiere muy poco de la exposición promedio de la población general (WHO, 2023). En varios estudios donde se registraron valores de intensidad de campo durante 24 o 48 horas el porcentaje máximo de viviendas altamente expuestas fue de un 3.3 %, siendo lo habitual que estuvieran en torno al 1% (IARC, 2002). En el Reino Unido, menos del 1% de los hogares se encuentran a menos de 50 m de líneas de transmisión y el 0,21% a menos de 100 m. Los porcentajes en otros países son similares: por ejemplo, en EE. UU se ha constatado que un 1,1% de las viviendas se encuentra dentro de los 40 m; en Dinamarca, un 0,43% dentro de los 75 m (EMF.info, 2023). En España, los porcentajes de viviendas altamente expuestas han sido mayores según un estudio llevado a cabo en diferentes poblaciones, en el cual se determinó que un 8% de las viviendas tenían valores de CM elevados, si bien los niveles medios en general fueron de $0.162 \pm 0.09116 \mu\text{T}$ (Calvente et al., 2014).

La diferencia entre países de los niveles de exposición residencial promedio y el porcentaje de viviendas altamente expuestas es debido a la distribución de la población en torno a las líneas eléctricas y a que las redes eléctricas principales de cada sitio presentan pequeñas diferencias en sus configuraciones geométricas, voltajes y cargas de trabajo. Por ejemplo, las flechas máximas y las cargas son mayores para las líneas de Reino Unido, por lo que suelen aplicar disposiciones de las fases que reduzcan los niveles de CM. Dependiendo de estos parámetros, los niveles de fondo se alcanzan entre los 50 m y los 300 m a las líneas eléctricas, ya que a estas distancias los campos generados por la corriente de carga de la línea se vuelven insignificantes.

Estas distancias también variarán a lo largo del día en consonancia con las variaciones diarias de carga de la línea. Los campos magnéticos generados por una LEAAT suelen alcanzar sus valores máximos entre las seis y las ocho horas de la tarde, cayendo a valores mínimos durante la noche (WHO, 2007) pudiendo existir una diferencia del orden de 1.6 (Calvente et al., 2014).

Otra causa que puede influir en los datos promedios de exposición residencial en diferentes países es el número de domicilios en los que se mide, pudiendo haber un sesgo si este no es suficientemente representativo.

4.1.2. Normativa y recomendaciones sobre límites de exposición

Está demostrado científicamente que, a dosis cortas, pero relativamente altas de la exposición, los CM son perjudiciales para la salud, pero no se ha podido constatar de forma clara las consecuencias de exposiciones temporalmente altas, pero de baja intensidad. El establecimiento de unos límites de exposición es el recurso del que disponen las autoridades para proteger a la población de los efectos adversos generados por los CM, y por debajo de estos, es posible garantizar la ausencia del riesgo.

Se entiende por valor límite de exposición un valor que se ha establecido a partir de consideraciones biofísicas y biológicas sobre la base de efectos agudos (efectos térmicos, estimulación eléctrica de los tejidos y efectos sensoriales y cerebrales) causados por exposiciones a CM por un corto periodo. A partir de estos se establecen en las recomendaciones y normativa los niveles de referencia que se deben adoptar. La superación de estos valores no implica necesariamente un perjuicio, pero sí una mayor probabilidad de tenerlo cuanto más se supere dicho umbral.

No existe un consenso internacional ni tampoco a nivel europeo sobre cuales deben ser los límites de exposición a campos magnéticos de frecuencia extremadamente baja, por lo que cada país establece sus propias normas al respecto. Sin embargo, la mayoría de estas normas han sido desarrolladas en base a las recomendaciones y directrices publicadas por diferentes organismos de reconocido prestigio internacional, siendo los más relevantes:

- **La Comisión Internacional de Protección contra la Radiación No Ionizante (ICNIRP).** Es desde 1992 la organización sucesora de la Asociación Internacional para la Protección contra la Radiación (IRPA) y del Comité Internacional para las Radiaciones No Ionizantes (INIRC) que, junto con la Organización Mundial de la Salud, han desarrollado diversos trabajos sobre las radiaciones no ionizantes en el marco de la salud ambiental. Sus funciones

son: “investigar los peligros que pueden ser asociados con las diferentes formas de RNI, desarrollar recomendaciones internacionales sobre límites de exposición para las RNI, y tratar todos los aspectos sobre protección contra las RNI” (ICNIRP, 1998). Las primeras recomendaciones que abarcaban campos de hasta 300 GHz de frecuencia fueron publicadas en 1998 y ampliadas en 2010 (ICNIRP, 2010) comprendiendo un rango de frecuencia de 1 Hz a 100 kHz. Establecen un nivel de referencia para la exposición ocupacional 1mT y para la exposición pública de 100 μ T. Este factor de seguridad mayor para la población en general se justifica principalmente por la variedad de personas expuestas en el entorno social es mucho más diversa que en el laboral y, además, estas personas no pueden tomar las precauciones para evitar o minimizar la exposición a CM que sí debe asumir un trabajador.

No obstante, en ambas situaciones, los niveles de referencia son aproximadamente 3 veces inferiores al campo magnético necesario para alcanzar las restricciones impuestas y del orden de 50 veces inferior al campo necesario para causar alteraciones biológicas reconocidas en animales, pero no consideran para su definición la evidencia científica sobre la asociación entre los CM y la leucemia infantil por considerarse demasiado débil.

- **El Consejo de Europa**, que mantiene en la actualidad la Recomendación de la UE establecida por el CONSEJO de 12 de julio de 1999 sobre la limitación de la exposición del público en general a los campos electromagnéticos (0 Hz a 300 GHz), 1999/519/CE. Esta recomendación se basa en los valores propuestos por la ICNIRP 1998 pero propone a sus estados miembros que los apliquen siguiendo criterios de coste/beneficio y donde el tiempo de exposición pueda ser relevante. Un ejemplo de medidas de mitigación de bajo coste es la transposición de fases. En 2013 publica otra directiva (2013/35/UE del Parlamento Europeo y del Consejo del 26 de junio de 2013, que deroga a la Directiva 2004/40/CE) pero sólo considera la exposición laboral.

- **La Junta Nacional de Protección Radiológica y Agencia de Protección de la Salud del Reino Unido (NRPB, ahora Salud Pública de Inglaterra PHE).** Es el responsable en este país de la protección de la salud y desarrolla investigaciones que permitan obtener resultados más claros sobre los posibles efectos de la radiación no ionizante incluida los campos de frecuencia industrial. En 1993 estableció unos primeros límites de exposición (NRPB, 1993) que actualizó en el 2004 (NRPB, 2004), recomendando que se adoptaran las pautas del ICNIRP 1998 con el propósito de promover un consenso internacional, si bien las hizo más restrictivas, estableciendo un nivel de referencia para el sector ocupacional de 500 μT y de 100 μT para la población en general.
- **El Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE)** es una organización profesional técnica formada por más de medio millón de miembros en cerca de 200 países. Con sede en Estados Unidos, entre sus principales actividades se encuentran la realización de publicaciones científicas, conferencias y la redacción de estándares tecnológicos. Su comité TC95 se ocupa de evaluar la seguridad de las exposiciones a CEM mediante el *“Desarrollo de estándares para el uso seguro de energía electromagnética en el rango de 0 Hz a 300 GHz en relación con los peligros potenciales de la exposición del hombre, materiales volátiles y dispositivos explosivos a dicha energía. No pretende incluir radiación infrarroja, visible, ultravioleta o ionizante”*. El estándar de referencia más actual publicado sobre la exposición residencial a CM FEB es el IEEE Std C95.1TM-2019: Estándar IEEE para niveles de seguridad con respecto a la exposición humana a campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos, de 0 Hz a 300 GHz" (Legros et al., 2019).
- **Instituto de Biología de la Construcción y Ecología (IBN de sus siglas en alemán Institut für Baubiologie und Oekologie).** Es un organismo alemán que lidera la investigación sobre la relación entre contaminación por factores físicos, químicos y biológicos y enfermedades crónicas, degenerativas y las denominadas «enfermedades raras», que afectan entre un 5% y un 7% de la población y en relación con los CM ha publicado la norma SBM-2008. Esta

normativa clasifica los valores de intensidad de CM como no significativos si son inferiores a ηT , débilmente significativos aquellos entre 20 y 100 ηT , fuertemente significativos si los valores de exposición oscilan entre los 100 y los 500 ηT y extremadamente significativos si superan este último valor.

4.1.2.1. *Situación legal en diferentes países*

En el año 2002, la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC), que forma parte de la Organización Mundial de la Salud (OMS), clasificó los CM FEB como un agentes físicos “posiblemente cancerígeno” (Grupo 2B) (IARC, 2002, 2013), por lo que se definió un principio de precaución en el apartado 2 del artículo 174 del Tratado de la Comunidad Europea (Doc. Com 2.2.2000) en el que además se insta a prestar especial atención especialmente a lugares sensibles como hospitales, escuelas y parques infantiles. Además, los límites adoptados por diversos países, dada la falta de un consenso acerca de la posible malignidad de las exposiciones a largo plazo a CM de FEB, los ha llevado a establecer en muchos de ellos límites de exposición mucho más bajos que los niveles de referencia del ICNIRP e IEEE siendo estos niveles muy diversos entre sí.

En España, únicamente existe una normativa de aplicación directa sobre la exposición a los CEM según el Real Decreto 299/2016, de 22 de julio, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición a campos electromagnéticos, que hace referencia únicamente a la exposición laboral. Para el resto de la población, se adoptan las recomendaciones recogidas en el en el cuadro 2 del anexo III de la Recomendación del Consejo 1999/519/CE, de 12 de julio, relativa a la exposición del público en general a los campos electromagnéticos de 0 Hz a 300 GHz, que se establece en 100 μT .

Las distancias de seguridad en torno a las líneas eléctricas que se determinan en el Real Decreto 223/2008, de 15 de febrero, por el que se aprueban el Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en líneas eléctricas de alta tensión y sus instrucciones técnicas complementarias ITC-LAT 01 a 09, están calculadas para evitar accidentes por descargas eléctricas a cualquier persona que se aproxime en exceso. Estas prescripciones técnicas establecen servidumbres de paso de las líneas eléctricas al terreno,

las edificaciones y la vegetación adyacente, de manera que no se produzcan accidentes eléctricos, y por tanto el propósito es totalmente ajeno a los posibles riesgos de la exposición residencial a CM.

En Austria, Chipre, Dinamarca, Finlandia, Letonia tampoco existe ninguna regulación al respecto o habiéndola basan sus límites en los de la UE de una manera no vinculante. Otros países fuera de la UE en consonancia con esta aplicación son Australia y Nueva Zelanda. En cambio, el cumplimiento obligatorio de los límites de exposición residencial recomendados por la UE se exige en Estonia, Francia, Grecia, Hungría, Irlanda, Luxemburgo, Portugal, República Checa y Rumania. En el resto de los miembros de la UE y en otros países, se aplican límites más estrictos mediante normativas nacionales. En Estados Unidos los niveles de referencia del IEEE son también de aplicación voluntaria. En el Anexo I se recogen los países para los cuales existen límites de exposición para la población en general, así como su estatus legislativo.

4.1.3. La necesidad de evaluar la exposición de las personas a los CM FEB

A finales de los años 70 y principio de los 80 varios estudios epidemiológicos (Wertheimer y Leeper, 1979 ; Wertheimer y Leeper, 1982) indicaron un aumento del riesgo de padecer cáncer en las poblaciones que residían más cerca de redes eléctricas de transmisión y distribución. Desde entonces, al objeto de contrastar esta hipótesis se han llevado a cabo una cantidad ingente de investigaciones, existiendo unas 3000 publicaciones de estudios sobre CM FEB relacionados con el cáncer (M. Repacholi, 2012) y 522 estudios epidemiológicos sobre campos de frecuencia industrial (50-60 Hz) (FEMU, 2023). Aproximadamente el 30% de estos estudios epidemiológicos han estado centrados en la leucemia infantil y otros tipos de cánceres en la niñez, un 16% en la leucemia de adolescentes y adultos, un 15% en cánceres cerebrales y un 12% en cáncer de mama. Otras investigaciones se han llevado a cabo sobre enfermedades neurodegenerativas, trastornos de hipersensibilidad a campos magnéticos o posibles efectos en el embarazo. Todos ellos se han focalizado de manera especial en el entorno residencial, y un número menor en el ámbito ocupacional y escolar.

A partir de estos estudios se realizaron varios análisis combinados en los que algunos (Ahlbom et al., 2000 ; Greenland et al., 2000) mostraron que para valores relativamente altos de la exposición residencial a estos campos había un mayor riesgo de leucemia infantil. Debido a la preocupación social que se generó (European Commission, 2010) se crearon varios grupos de trabajo de expertos de reconocido prestigio en la materia al objeto de evaluar los numerosos trabajos científicos publicados. En el año 2002, la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) determinó la clasificación como “posiblemente cancerígenos para los humanos” o Grupo 2B (IARC, 2002) de los campos magnéticos de baja frecuencia, para la leucemia infantil, mientras que para otros tipos de enfermedades en niños o adultos la evidencia resultó inadecuada.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) (WHO, 2007) recoge que la clasificación Grupo 2B se aplica cuando la evidencia epidemiológica sobre la carcinogenicidad es “limitada” y tampoco los estudios experimentales han podido probar un mecanismo biofísico que explique los posibles efectos biológicos de la inducción magnética a niveles de exposición ambiental. Otro grupo de trabajo de la OMS concluyó que a partir de la literatura científica disponible no era posible confirmar que la exposición residencial a CEM FEB fueran perjudiciales para la salud (WHO, 2023).

Varias revisiones sistemáticas posteriores realizadas por la OMS, por el Comité Científico de Riesgos para la Salud Emergentes y Recientemente Identificados (SCENIHR) de la Comisión Europea (CE) [2007, 2009, 2015] (SCENIHR, 2015), y por el proyecto ARIMMORA de la Unión Europea de "Investigación avanzada sobre mecanismos de interacción de exposiciones electromagnéticas con organismos para la evaluación de riesgos" (Schüz et al., 2016) han mantenido esta categorización del riesgo como Grupo 2B para la exposición residencial a CM FEB.

Sin embargo, son muchos los trabajos con resultados muy dispares entre sí, por lo que todavía sigue habiendo una gran incertidumbre en la comunidad científica sobre los posibles efectos adversos de la exposición residencial a CM FEB (Maslanyj et al., 2009). Por ello, son necesarios nuevos estudios para confirmar o descartar si la asociación observada en los estudios epidemiológicos se debe realmente o no a una posible relación causal (SCENIHR, 2015).

La OMS y SCENIHR consideran que la información proporcionada por los estudios epidemiológicos no es consistente debido a los problemas y deficiencias metodológicos que presentan estos estudios. El objetivo de los estudios epidemiológicos es determinar si existe una probabilidad mayor de padecer cáncer u otra enfermedad estudiada en las personas expuestas y en caso de que la haya, cuantificar el nivel de exposición dañino. Para ello, se categorizan grupos de población según sus niveles de exposición, incluyendo grupos considerados como no expuestos y se comparan las tasas de incidencia de la enfermedad entre ellos.

Sin embargo, un estudio epidemiológico se limita a probar una asociación estadística pero no puede concluir unívocamente si la enfermedad es causada por el CM, pues resulta imposible separar este de otros muchos factores que pueden incidir sobre la salud de las personas, ya sean de tipo fisiológicos, socioeconómicos u otros factores también de tipo ambiental. Algunos ejemplos son la movilidad residencial a lo largo de la vida, exposición a otros contaminantes como pueden ser el tráfico o los pesticidas, residir en un entorno urbano vs rural, las medidas ecológicas y personales implementadas en cada sitio de los Estándares Sociales y Ambientales (SES) del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) y las propias medidas de CM (Amoon et al., 2020; Malagoli et al., 2023). También se ha sugerido que otros efectos causados por las líneas eléctricas aéreas como las partículas ionizadas o las corrientes de contacto pudieran ser relevantes (Kavet et al., 2004). Al contrario que algunos estudios que han mostrado un mayor riesgo de leucemia infantil para los niños que residen a pocas decenas de metros de las líneas, no existe ninguna evidencia respecto a los CM causados por electrodomésticos (Jeffers et al., 1999).

Aun asumiendo estas complicaciones debidas al campo eléctrico en los estudios epidemiológicos sobre exposición a CM, sólo el hecho de tratar de caracterizar con precisión esta exposición de las personas a los CM ha sido y es aún un reto importante en epidemiología ambiental. Los principales obstáculos en este sentido son (Ahlbom et al., 2001; IARC, 2002):

- Toda la población se encuentra expuesta en menor o mayor medida a los campos magnéticos a lo largo de toda la vida, por lo que resulta imposible medirlos directamente a lo largo del pasado de las personas, incluso para periodos de tiempo más cortos que puedan considerarse relevantes, como sus meses de gestación, el año de nacimiento, el año del diagnóstico u otros propuestos en diferentes investigaciones. Al no tener conocimiento sobre los posibles mecanismos de los CM FEB que pudieran inducir la oncogénesis u otras enfermedades, tampoco es posible conocer cuál es el periodo más relevante de la exposición.
- Por otra parte, los CM son muy variables en el espacio y en el tiempo. La exposición de una persona puede ser variable dentro de su propia casa y más aún con su movilidad diaria. La exposición residencial no contempla la movilidad de las personas ni la exposición ocupacional, excepto cuando trata de determinarse mediante aparatos de medida personales de CM, que sí recogen los valores de campo en todos los lugares en los que se encuentre la persona que porta el dispositivo de medida. En zonas próximas a la línea eléctrica, este efecto de la variación espacial es aún mayor dado que la inducción magnética decrece a razón del cuadrado o del cubo de la distancia a las líneas eléctricas. Temporalmente, los CM pueden variar rápidamente en escalas de pocos segundos y también están sujetos a las variaciones propias de las demandas energéticas en las diferentes estaciones y días del año, lo que inevitablemente requiere que para estimar la exposición deban aplicarse promedios además de tener que adoptar ciertas suposiciones sobre su representatividad temporal. Se ha demostrado que las mediciones de CM contemporáneas no son representativas de las exposiciones pasadas.
- Los niveles de intensidad del CM para los cuales se ha sugerido un mayor riesgo se encuentran en torno a $>0.3 \mu\text{T}$. Determinar qué parte de la población se encuentra próxima o supera esa exposición con márgenes de error inferiores a las décimas de micro teslas resulta sumamente complicado. Además, tampoco está

totalmente clara cual es cantidad de exposición de CM relevante para el riesgo de leucemia infantil u otras enfermedades.

A estas dificultades inherentes a la naturaleza de la exposición de las personas a CM de FEB se unen las derivadas de tener que modelar y reproducir el entorno físico de una población de manera que permita conocer con suficiente precisión la localización de los puntos de medida respecto a las instalaciones eléctricas, puesto que la distancia a las mismas constituye un factor clave en la exposición.

Así pues, en los estudios epidemiológicos de exposición residencial a CM debe abordarse, por un lado, la dificultad de cuantificar de forma precisa los niveles de exposición, y por otro, el de modelar o reproducir con suficiente precisión todos los factores que influyen en los valores de CM para que la estimación de la exposición sea lo más precisa posible. Las estimaciones a partir de datos históricos de las líneas eléctricas y de las ubicaciones de los domicilios de la personas, están sujetas a limitaciones asociadas a los datos disponibles y a su calidad.

Estas y otras dificultades metodológicas han dado lugar a que los investigadores hayan tenido que recurrir a diferentes sustitutos de la exposición pero que, como tales, llevan asociados una imprecisión que puede sesgar los resultados estadísticos sobre el riesgo. No obstante, estos sustitutos han permitido abordar un importante número de investigaciones que han aportado más información sobre el posible riesgo de estos campos sobre la salud de las personas. Junto con los avances tecnológicos de las últimas décadas, las metodologías se han desarrollado de manera que han permitido realizar estos complejos estudios epidemiológicos de manera mucho más eficiente y cuyos resultados han permitido ir estrechando el enfoque de futuras investigaciones (WHO, 2023).

4.2. Metodologías para la estimación de la exposición a CM. Evolución y aportaciones de los Sistemas de Información Geográfica

La investigación sobre la posible relación entre diversas enfermedades y la exposición residencial a CM FEB lleva realizándose desde hace más de tres décadas. La realización de estos estudios epidemiológicos siempre se ha visto obstaculizada por la inexistencia

de un método de exposición residencial a CM de FEB validado por la comunidad científica y el alto costo que implica estimar esta exposición para largos periodos de tiempo con la suficiente precisión como para detectar pequeños efectos en grandes poblaciones (Bürge et al., 2017).

No obstante, en consonancia con el desarrollo tecnológico de finales del siglo XX, la metodología y la calidad de los estudios han mejorado con el tiempo (Feychting et al., 2004) siendo un aspecto importante en esta mejora el cómo se evalúa la exposición a CEM (Swanson et al., 2019). Ya en el año 2001, Ahlbom consideraba que la calidad de los estudios estaba cerca del límite de lo que se podía lograr de manera realista en términos de tamaño del estudio y rigor metodológico. Aunque en la actualidad, continúan investigándose procedimientos para modelar con mayor precisión la exposición temporal a CM, los métodos de evaluación de la exposición se pueden agrupar en dos enfoques principales:

- Métodos directos, basados en mediciones y/o cálculos de campos magnéticos. Dentro de ellos pueden diferenciarse según:
 - Niveles de campo magnético históricos calculados.
 - Niveles de campo magnético medidos, que dependiendo de si los dispositivos de medida se ubican un lugar de la vivienda o son llevados por las personas se diferencian en dos tipos:
 - Mediciones de áreas residenciales, en una ubicación o varias de las viviendas en habitaciones consideradas como las más habitadas y durante un periodo de tiempo determinado.
 - Mediciones personales del campo magnético, basadas en el monitoreo personal.
- Métodos indirectos, que utilizan sustitutos de las mediciones o de los cálculos de CM FEB y están basados principalmente en indicadores definidos en base a la

distancia a las líneas eléctricas, y asociados o no con datos particulares de las líneas más cercanas al punto en el que se está estimando la exposición. Estos son:

- La distancia entre líneas eléctricas y residencias.
- Los códigos de cable.

En un estudio sobre la revisión de los métodos para caracterizar la exposición defienden que los basados en cálculos pueden realizar estimaciones de la exposición histórica con una adecuada precisión y clasifican el resto de los métodos en tres grupos atendiendo a la calidad en que evalúan la exposición a CM (Swanson et al., 2019), que ordenados de mayor a menor quedarían:

- Estimaciones de campo magnético cuantificado. Dentro de estas se engloban:
 - Las mediciones tanto de tipo residencial como personal mediante registros de 24 horas o valores de intensidad de campos magnéticos calculados. Se consideran que estos tipos de estudios sí cumplen realmente un criterio de calidad.
 - Mediciones residenciales o personales, pero registradas de forma puntual o a corto plazo.
- Estimaciones de campo magnético no cuantificado. Dentro de esta categoría se encontrarían los códigos de cables y las estimaciones basadas únicamente en la distancia de las residencias a las líneas eléctricas.

En el análisis agrupado de estudios sobre el riesgo asociado a la exposición a CM y la leucemia infantil donde se llevó a cabo esta categorización de la adecuación de los métodos de evaluación a la exposición residencial de CM, se concluyó que los avances en la calidad de los estudios desarrollados en las dos últimas décadas podían explicar en parte la disminución del riesgo que se había constatado desde aproximadamente 1995, pero que, en cualquier caso, este seguía siendo alto y todavía no podía descartarse que hubiera una relación causal.

A continuación, se describen los diferentes métodos para estimar la exposición personal a campos magnéticos.

4.2.1. Código de cables

Los primeros estudios se basaron en medidas indirectas mediante un método conocido como código de cable o Wertheimer-Leeper (WL), el cual fue introducido por primera vez por estos autores en un estudio de casos y control que mostró una asociación entre la exposición a CM y la leucemia infantil en Denver (EE. UU.) en 1979 (Wertheimer & Leeper, 1979). Estos autores clasificaron la exposición de cada sujeto en función de la proximidad de su residencia a la línea eléctrica aérea más cercana y de acuerdo con una serie de parámetros relacionados dicha línea, que son el voltaje y la configuración del cableado. De esta forma obtuvieron dos posibles clasificaciones para las viviendas: una configuración de corriente alta (HCC) y una configuración de corriente de baja (LCC), que posteriormente refinaron en cinco categorías (Wertheimer & Leeper, 1982). Estas fueron:

- Configuración de corriente muy alta (VHCC). En esta categoría se incluyen las viviendas situadas:
 - a menos de 15 m (50 pies) de cables de Clase 1 (cableado de gran sección en configuración trifásica, habitual en líneas de distribución primarias),
 - a menos de 7.5 m (25 pies) de cables de Clase 2 (cableado también de redes primarias, pero con menor sección).
- Configuración de corriente ordinaria alta (OHCC), que se corresponde con la configuración de cables codificada como HCC en la primera clasificación de W-L. Quedarían incluidas las viviendas con tales disposiciones:
 - viviendas situadas entre 15-39.5 m (50-129 pies) de una línea eléctrica aérea con cables de tipo Clase 1,

- viviendas situadas entre 7.5-19.5 (25-64 pies) de una línea eléctrica aérea de Clase 2,
 - viviendas situadas entre 0-15 m (0-50 pies) de una línea eléctrica aérea de Clase 3 (cables de redes de distribución secundarias entre postes con transformador).
- Configuración de corriente ordinaria baja (OLCC). En esta categoría se incluyen todas las viviendas con las posibles configuraciones restantes excepto las configuraciones de polo final, que se corresponderían con las clasificadas como LCC en el estudio original excepto el polo final, incluso cuando el primer tramo de la línea da servicio a dos viviendas unifamiliares o menos, independientemente de la distancia.
- Configuración de corriente muy baja (VLCC). Esta categoría incluye las viviendas situadas más allá del polo extremo de una línea de distribución.

Para la clasificación de la exposición según WL las viviendas situadas a una distancia superior a 130 pies (40 metros) a la línea eléctrica más próxima no son consideradas. Otra característica fundamental de los códigos de cables es que categorizan la exposición personal en función de la capacidad de la carga de la línea eléctrica más próxima, pero no considera la corriente real que circula por ella ni ningún promedio de esta durante el período de tiempo de interés. Tampoco tiene en cuenta ningún campo magnético procedente de otras fuentes, como puede ser el cableado doméstico. Sin embargo, son varios los autores que sostienen su validez habiendo comparado estas medidas indirectas con medidas directas simultáneas de CM dentro de las viviendas (Kaune et al., 1987; Neutra & del Pizzo, 1996).

Estos concluyen que los códigos de configuración de cables pueden ser un mejor sustituto de la exposición histórica a campos FEB emitidos por líneas eléctricas que la medición directa en un solo punto reciente en el tiempo por dos motivos principales. El primero es que permite estimar la exposición sin la necesidad de la participación ni consentimiento de ningún individuo ya que se evita tener que acceder a las viviendas para

realizar medidas del CM y de esta forma se reduce el posible sesgo de selección. El segundo, se basa en que el interés de los estudios epidemiológicos sobre CM son los datos históricos y en estos términos consideran que los códigos de cables son un indicador estable para largos periodos de tiempo, y por tanto representan de forma mucho más robusta una exposición histórica que una medición tomada de forma puntual. Por ejemplo, las codificaciones de las viviendas determinadas en 1985 para un estudio epidemiológico (Savitz et al., 1988) fueron revisadas varios años después (Dovan et al., 1993) y obtuvieron una tasa de acuerdo del 90% en la clasificación con el estudio original (89% de acuerdo para los domicilios de casos y 91% para controles). Dado que se considera que una exposición continua, aún a niveles bajos de radiación, puede ser mucho más nociva que exposiciones relativamente breves pero fuertes, surgen dudas acerca la idoneidad de las medidas de la intensidad del campo para proporcionar la información necesaria en estos estudios, mientras que los códigos de cables pueden caracterizar la continuidad y la intensidad de la exposición.

Esto podría explicar el hecho de que en varios estudios (Savitz et al, 1988; London et al., 1991) se encontraron asociaciones de la enfermedad estudiada con las exposiciones representadas por la categoría más alta del código de cables, pero no con los valores más altos categorizados mediante mediciones directas. En cambio, otras posibles explicaciones que se han sugerido son que el código de cableado pudiera ser además un sustituto de otros factores que aumentan el riesgo de enfermedades, o simplemente que los métodos de evaluación de la exposición residencial desarrollados hasta finales de los 90 no caracterizan adecuadamente la exposición residencial. En base a la primera premisa, algunos autores han investigado de forma conjunta los campos magnéticos y la contaminación por tráfico (Ebi, 1999), observando una asociación de códigos de cableado de alta configuración con una mayor densidad de tráfico.

Esta misma premisa a favor del código de cables también ha sido planteada como una desventaja. Por otra parte, también son varios los estudios que afirman que el código de cables tiene limitaciones como un predictor preciso de los campos magnéticos. Un argumento es que debe haber más factores de contaminación ambiental, socioeconómicos y urbanísticos que podrían incidir en las asociaciones encontradas entre la categoría más

alta de WL y la prevalencia de diversas enfermedades (Siemiatycki, 1993). De este modo, la caracterización de WL representa no sólo una alta exposición a CM generados por líneas eléctricas sino también otros posibles factores que aún no se encuentran identificados. Por otra parte, otros autores que compararon varios métodos para evaluar la exposición observaron que el modelo que mejor predijo las exposiciones personales a CM eran las correspondientes a mediciones de 24 horas en el dormitorio y en la habitación más frecuentada (Schoenfeld et al., 1999) y además encontraron una destacable superposición de niveles de CM entre categorías de W-L (Rankin et al., 2002). También se ha constatado que este código limita su utilidad a la predicción sólo de hogares con campos magnéticos altos (Kheifets et al., 1997; Tworoger et al., 2002).

A pesar de esta falta de consenso sobre la capacidad predictiva de los códigos de cables, el método de Wertheimer-Leeper fue en las décadas de los 80-90, el sustituto más utilizado para las medidas de exposición residencial a campos magnéticos en estudios de cáncer, si bien varios estudios analizaron dentro de la misma investigación varios indicadores de exposición. En una revisión de 19 estudios sobre cáncer infantil y en adultos que se realizó a finales de los 90, se determinó que 13 de estos estudios se habían basado en el código de cables y que, en ocho de ellos, el código de cables se aplicó de forma exclusiva sin considerar ningún otro método de la evaluación de la exposición (Bracken et al., 1998). No sólo se aplicó en los EE. UU., sino que también despertó interés en nuevos estudios llevados a cabo en otros países como Canadá, México o en distintas regiones de Europa y para determinar la asociación con otras posibles enfermedades oncológicas incluso en adultos diferentes de la leucemia infantil (Amoon et al., 2018).

4.2.1.1. Evolución de la implementación del método Código de Cables

Este auge de investigaciones basadas en el código WL como indicador de la exposición promovió adaptaciones y/o mejoras técnicas de la misma. Una de las primeras se encuentra en un estudio de casos y controles sobre la leucemia infantil llevada a cabo en Rhode Island, Estados Unidos en 1980 (Fulton et al., 1980), en las que adaptaron la definición de cable secundario, así como una asignación en la categorización de niveles de exposición diferente de la original, asignando pesos de exposición a cada tipo de cable

basándose en la mediana del valor de la intensidad de campo obtenida según la codificación de Wertheimer y Leeper.

En 1988, Savitz et al. agregaron una categoría más a las cuatro existentes de WL donde se incluían las líneas eléctricas subterráneas, quedando la clasificación tal y como se observa en la Figura 4.2:

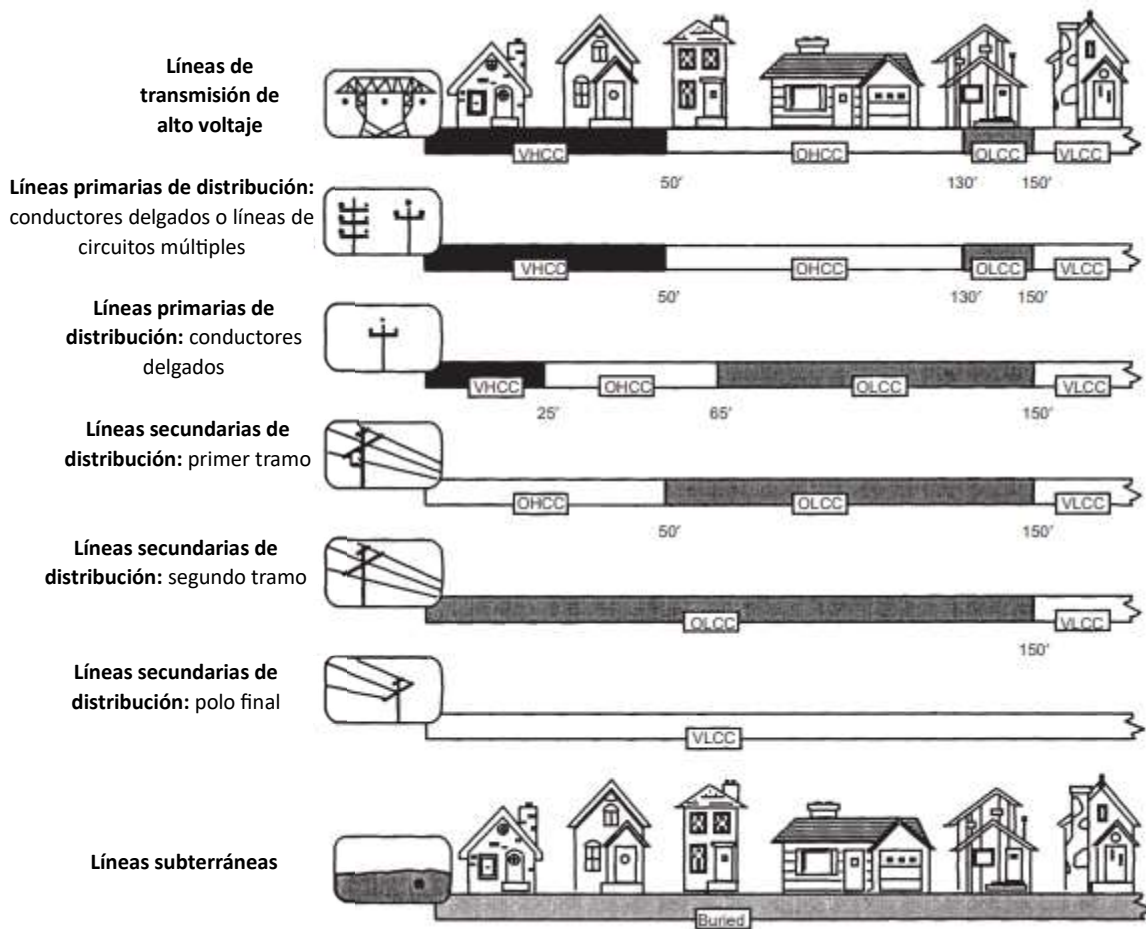


Figura 4. 2. Reclasificación del sustituto de la exposición “código de cables”. Fuente: Ebi et al., 1999

En cambio, en un estudio en Inglaterra (Coleman et al., 1989) aplicaron una clasificación similar pero no tuvieron en cuenta la posible influencia de la red eléctrica subterránea argumentando que esa región, estos cables se encuentran entrelazados de forma helicoidal además de soportar una tensión no superior a 132 kV, lo que causa

corrientes desequilibradas de poco valor que generan campos magnéticos que decaen rápidamente con el cubo de la distancia. No obstante, ampliaron la cota de distancias a las líneas eléctricas, incluyendo en el estudio las viviendas situadas hasta a 100 m de estas, mientras que la codificación de cable original asumía las viviendas situadas a más de 40 m como no expuestas. Estas distancias se registraron a partir de más de 600 mapas topográficos a escalas 1:1250 y 1:2500. Las coordenadas X-Y del centro de gravedad de las viviendas, determinado este como el punto de estimación para valor de la exposición, se registraron mediante unos dispositivos de escala con una sensibilidad de 5 m en cada eje. Otras variables relativas al tipo de cable fueron obtenidas mediante inspecciones visuales en campo por técnicos cualificados y a ciegas en cuanto a casos y control, al objeto de evitar sesgos en la categorización.

En 1993, se realizó una réplica (Savitzt & Kaune, 1993) del estudio de Whertemeier-Leeper respetando los casos de referencia analizados en Denver, Colorado (EE. UU.) pero reduciendo el esquema de las categorías de código de cables a sólo tres:

- código de cables alto (HWC), para viviendas a menos de 20 m de una línea primaria de transmisión trifásica,
- código de cables medio (MWC), para viviendas situadas entre 20 m y 46 m de una línea primaria trifásica o a menos de 26 m de una línea secundaria o abierta,
- y código de cables bajo (LWC) donde se engloban las restantes.

El objetivo de esta simplificación de categorías fue minimizar al máximo las variables del método de WL que pudieran estar sujetas a una valoración subjetiva y así, minimizar la posibilidad de cometer errores en la asignación de la categoría de exposición por los técnicos competentes. Era habitual en la época que estos técnicos realizaran la identificación de líneas de primer o segundo tramo y la determinación del grosor del cable, mediante inspecciones visuales, por comparaciones relativas del cableado existente en ese tramo de red y sin atender a ningún método estandarizado. Los mismos autores volvieron a corroborar con éxito la idoneidad de esta modificación en un estudio posterior (Kaune & Savitz, 1994) por lo que tanto el esquema de cinco categorías de Whertemeier-

Leeper como el de tres de Kaune-Savitz se aplicaron conjuntamente en nuevos estudios de casos y controles sobre la leucemia infantil (Green et al., 1999; Linet et al., 1997; McBride et al., 1999) si bien la adecuación de estos métodos de evaluación de la exposición ha sido discutidos en investigaciones más recientes (Ahlbom, 2001).

Cabe destacar que, además, en la investigación realizada por Linet et al. (1997), estos códigos fueron implementados mediante un algoritmo informático que asignaba a las residencias la categoría correspondiente en función de la distancia y tipo de cableado de la línea eléctrica más cercana a partir de mapas digitalizados. La automatización de procesos también se recoge un año antes en una investigación sobre la exposición residencial a CM y los tumores cerebrales infantiles llevado a cabo en California, Los Ángeles (Preston-Martin et al., 1996), donde mediante el software AutoCAD (Autodesk, Inc., San Raphael, California) se trazaron mapas de los tendidos eléctricos situados hasta 45.72 m (150 pies) de las casas y se exportaron los datos sobre las configuraciones del cableado a una base de datos. También integraron mapas facilitados por las empresas distribuidoras de servicio eléctrico mediante el software Facility Mapping System/AutoCAD que se había adaptado previamente en otro estudio similar (London et al, 1991) para a partir de los mapas y la base de datos generada, asignar de forma ciega los códigos de WL a cada vivienda de interés. Otros autores (Bracken et al, 1998) también se apoyaron programas informáticos para asignar a las viviendas la codificación W-L desde la categoría de subterráneo hasta VHCC, una vez recopiladas las distancias mediante trabajos a pie de calle (dentro de 150 pies, 47.5 metros) y consultadas las secciones del cableado a partir de los mapas de la compañía eléctrica.

Sin embargo, un avance importante que permitió asignar de forma automática los códigos a cientos de miles de viviendas se basó en un Sistema de Información Geográfica (Ebi, 1999; Ebi et al., 2000). Los datos de entrada de las líneas eléctricas (sección de cada conductor, configuración, número de fases, voltaje, apoyos, etc.) se obtuvieron a partir de otro SIG correspondiente al sistema de distribución de electricidad de la compañía de servicios públicos de Colorado (Denver, EE. UU.) y las geocodificaciones de las viviendas se obtuvieron a partir de registros de tasadores de impuestos. La aplicación de los SIG fue más allá de las meras funcionalidades de inventario. Se aplicaron operaciones

espaciales para determinar áreas de influencia de las líneas eléctricas en su entorno que serían función de la categoría de WL asignada previamente a cada línea. Posteriormente, mediante análisis espaciales de superposición se clasificaron en diferentes niveles de exposición las viviendas según su pertinencia a cada área de influencia. Además, para el cálculo de las distancias a las líneas eléctricas se aplicaron herramientas de análisis topológico, así como fotografías áreas ortorrectificadas. Las viviendas clasificadas fueron las estudiadas en los trabajos de Savitz et al, de 1988 obteniendo un buen acuerdo general. El 55% de las distancias comparadas coincidieron con una precisión de 10 pies (3.048 m) y el 85% con 20 pies (6.096 m).

A pesar de los avances tecnológicos, un problema aún no resuelto que podría repercutir en los sesgos de selección ha sido el descarte de viviendas situadas en apartamentos de varios pisos sobre el nivel del suelo, dada la inviabilidad de reflejar para estas el valor indirecto del CM por su dificultad a la hora de concretar la posición de las viviendas tanto horizontal como verticalmente dentro de estos edificios (McBride et al, 1999; Ebi, 1999). Otra dificultad al que deben enfrentarse los estudios basados en esta caracterización de la exposición es que no siempre resulta factible obtener datos sobre la línea eléctrica por procedimientos de inspección visual o que estos sean facilitados por las compañías de distribución eléctrica. Debido a estas dificultades y dada la controversia sobre la calidad de este indicador, numerosos estudios han optado por utilizar simplemente la distancia entre el cableado aéreo y las viviendas como un posible sustituto de la exposición residencial a CM de FEB, el cual se detalla en el siguiente apartado.

4.2.2. Distancia a la línea eléctrica o a una fuente de CM FEB

Si bien en Estados Unidos los primeros estudios tomaron como referencia el método de evaluación de la exposición basado en los códigos de cables, en Europa y varios países nórdicos fue la distancia el indicador de la exposición a CM más generalizado. En los estudios epidemiológicos basados en este concepto se examinaba el riesgo de padecer cáncer en relación con la proximidad de los domicilios de las personas a las líneas eléctricas, subestaciones, transformadores incluso también líneas de ferrocarril. También el interés por investigadores de otros países a la hora de aplicar este método ha sido elevado. Entre 1993 y 2016, se han documentado 21 estudios internacionales sobre la

posible asociación entre la leucemia infantil y la distancia a las líneas eléctricas (Amoon et al., 2018) y en la actualidad es un método que, a pesar de sus limitaciones como un predictor de la exposición, continúa siendo la base de muchas investigaciones para tratar de determinar si existe o no una prevalencia de diversas enfermedades en los entornos de instalaciones eléctricas (Frei et al., 2013; Gervasi et al., 2019; Malagoli et al., 2023).

La intensidad del campo magnético es una función que depende entre otros factores de la distancia entre el punto de cálculo y la línea eléctrica, tendiendo a decrecer su valor con el cuadrado o el cubo de la distancia, dependiendo de la configuración del cableado de la línea. Por lo tanto, los campos magnéticos y la distancia tienden a tener una alta correlación. Utilizar la distancia como un indicador de la exposición residencial a CM presenta ventajas similares al código de cables: reduce el sesgo de selección al evitar la participación de los sujetos pues tampoco requiere el acceso a los domicilios y, además, al ser estudios que requieren únicamente direcciones domiciliarias y la mera localización de las redes eléctricas, permiten abordar de manera eficiente un elevado número de casos y controles (Amoon et al., 2020). Por ello, la distancia se ha convertido en un sustituto de los niveles de CM FEB ampliamente investigado, en el que el término “distancia” se entiende siempre como la distancia horizontal más corta entre la ubicación donde se quiere estimar la exposición y la línea eléctrica aérea más próxima, siendo habitual no considerar las líneas subterráneas.

La clasificación de la exposición se realiza en base a diferentes cuartiles de distancia hasta un valor máximo de la misma donde la posible afectación del CM se considera insignificante, en torno a los 150-200 m (Feychting & Alhbolm, 1993; Kleinerman et al., 2000; McBride et al., 1999; Olsen et al., 1993; Tynes & Haldorsen, 1997) habiendo otros estudios donde se han investigado posibles riesgos asociados a la exposición residencial a CM considerando domicilios ubicados hasta los 600 m (Skinner et al., 2000; Wunsch-Filho et al., 2011).

Los cuartiles de exposición habitualmente eran definidos con el propósito de poder comparar resultados con otras investigaciones si bien sus acotaciones han sido numerosas. Así, Myers' et al., (1990) establecieron rangos cada 25 metros dentro de una distancia máxima de 100 m. Tynes and Haldorsen (1997) propusieron las categorías 0-50

m, 51-100 m y 101 m o más. Draper et al., (2005) en Inglaterra y Gales investigaron dos posibles categorizaciones: una más simple estructurada en bandas de 0-199 y 200-599 y otra en 0-49 m, 50-99 m, 100-199 m, 200-299 m, hasta los 600 metros, que al mostrar una asociación entre viviendas cercanas a líneas eléctricas aéreas con casos de leucemia infantil ha sido replicado en otras grandes poblaciones, como en Dinamarca (Pedersen, Raaschou-Nielsen et al., 2014), en Francia (Sermage-Faure et al., 2013) y California (Crespi et al., 2016). En este último estudio se usaron además puntos de corte extendidos hasta los 2000 m con categorías de exposición de 600-1000 m, 1000-1500, 1500-2000 m y más de los 2000 m. Bunch et al., (2014) actualizó el estudio de Draper et al (2005), incluyendo casos y controles más recientes pero extendiendo sólo la evaluación hasta los 1000 m con franjas de exposición según 0-199, 200-599, 600-999, +=1000. Los estudios más recientes citados en este apartado, desde el año 2011, han utilizado puntos de corte en <100 m, 100-<200 m y 200-<400 m clasificando a los sujetos a más de 400 m como no expuestos.

Este umbral máximo también ha sido establecido en otras investigaciones (Marcilio et al., 2011) donde se evalúan las posibles asociaciones entre diversas enfermedades cerebrales y la proximidad a las líneas eléctrica, pero dividiéndolo en cuatro categorías ≤ 50 , $>50-\leq 100$, $>100-\leq 200$, $>200-\leq 400$ y >400 para el grupo de referencia. En grandes estudios sobre enfermedades neurodegenerativas llevados a cabo en Suiza (Huss et al., 2008) y Dinamarca (Frei et al., 2013) se aplicaron puntos de corte en 0-<50, 50-<200, 200-<600, +=600.

Un estudio sobre la infertilidad de las mujeres (Ahmadi et al., 2019) caracterizó las sujetos como no expuestas si vivían a más de 1000 m de las líneas, con exposición baja aquellas mujeres residentes entre los 1000 y 500 m, y con alta exposición, aquellas a menos de 500 m de las líneas. Todos los datos geográficos asociados a las líneas eléctricas, así como las distancias se obtuvieron de las bases de datos del Sistema de Información Geográfica de las compañías eléctricas y mediante la evaluación de imágenes aéreas de Google Earth. La aportación de estas herramientas digitales para la clasificación de la exposición basada en la distancia se detalla en el siguiente apartado.

4.2.2.1. Evolución de la implementación del método de distancias

La determinación de la distancia entre las viviendas y la línea eléctrica exige la definición de la ubicación de estas mediante uno o varios puntos. Estas referencias de las viviendas varían entre estudios, así como los procedimientos técnicos para el cálculo de las distancias, lo cuales han estado ligados a los avances en cartografía digital. Hasta finales del año 2000 era habitual que los investigadores determinaran estas medidas por procedimientos manuales mediante visitas a los sitios o en el mejor de los casos sobre mapas o fotografías aéreas. Sin embargo, estos procedimientos conllevaban un elevado coste tanto económico como de esfuerzos.

Los noruegos Vistnes et al., (1997) midieron las distancias desde el eje de la línea eléctrica aérea a la esquina más cercana de la casa. Tynes and Haldorsen (1997) midieron las distancias sobre mapas desde el rincón más cercano de la casa al punto medio entre las fases exteriores de cada línea. En cambio, en el estudio inglés que abarcó la mayor distancia al tendido eléctrico (Bunch et al., 2014) se calcularon las distancias usando geometría de coordenadas, estableciendo las coordenadas correspondientes a cada vivienda ubicada en alguna zona dentro de la huella del edificio en cuestión según una referencia de cuadrícula de 0.1 m de resolución. Otro estudio brasileño (Marcilio et al., 2011) geocodificó las direcciones suponiendo un ancho medio de 10 m para las calles, y una distancia de 8 a 15 metros entre el eje de la calle y la puerta de acceso a la vivienda, aplicando diferentes herramientas de un Sistema de Información Geográfica. También en otro estudio realizado en San Pablo (Brasil) utilizaron el SIG MapInfo para generar una base cartográfica de las LEAAT a partir de distintas bases de datos y a partir de ellas, generar áreas de influencia alrededor de ellas de diferentes valores de CM adoptados según estudios en otros países e integrar, además, datos del censo de población para analizar la población expuesta (Habermann et al., 2010).

Los Sistemas de Información Geográfica han sido una herramienta habitual en estos tipos de estudios. En el estudio GEOCAP francés (Sermage-Faure et al., 2013) se digitalizaron aproximadamente 77400 km de líneas eléctricas aéreas de alta tensión sobre mapas de su Instituto Geográfico Nacional. Junto con el catastro francés y mediante los

softwares MAPINFO GIS y NAVTEQ, así como con inspecciones virtuales desde Street View (Google Maps), geocodificaron los estudios de casos y controles.

En Dinamarca, Pedersen et al., (2014) realizaron el cálculo de distancias para 1577 casos y 3191 controles mediante el software ArcGIS 9.3, que también sirvió para georreferenciar la base de datos de direcciones danesas y volcar los datos sobre líneas eléctricas aéreas de 132–400 kV actuales e históricas de las siete empresas de transmisión danesas.

Kheifets et al., (2015) aplicaron una metodología SIG para la determinación de distancias de los domicilios a las líneas eléctricas basada en tres niveles. El primer nivel determinaba las distancias a partir de la base de datos SIG de las empresas de gestión eléctrica para todas las viviendas dentro de la zona de estudio, esto es, hasta los 2000 m, que fueron validadas mediante una muestra aleatoria que se comparó con medidas obtenidas mediante Google Earth. El segundo nivel consistió en realizar la misma validación, pero de forma íntegra para todas las viviendas situadas a menos de 200 m. Se obtuvieron coeficientes de correlación de Pearson de 0,899 para las viviendas dentro de los 200 m a las LEAAT y de 0,998 para las situadas entre los 200 y 2000 metros. Estas validaciones sirvieron para corregir el 14% de viviendas (272 domicilios de 1605 observados) que no se habían clasificado correctamente de exposición. El tercer y más exhaustivo nivel para el cálculo de las distancias se consideraron las viviendas donde se suponía una elevada exposición a CM (<80 m para líneas de 100 a 200 kV, <150 m para líneas de 200 a 345 kV y <200 m para líneas de 500 kV) por lo que estas distancias se estimaron mediante visitas personales al sitio. Para ello se registraron mediante GPS los puntos más alejados y cercanos de la vivienda a la línea eléctrica más cercana, y además el centro en aquellas a las que se pudo acceder a su interior. Dado el elevado número de recursos requeridos para los trabajos de campo, se valoraron únicamente los casos de leucemia y sólo 25 viviendas por zona gestionada por cada empresa de servicios. En este mismo estudio, para determinar el trazado de las líneas se fusionaron los SIG de las compañías de servicio de mayor tamaño implicadas y, para las empresas de menor tamaño, las líneas eléctricas se reconocieron a partir de imágenes aéreas, permitiendo así estudiar hasta 13000 viviendas. En la figura inferior (Figura 4.3) se recoge el flujo de

trabajo aplicado por los autores para la determinación de las distancias entre los domicilios y las diferentes líneas eléctricas aéreas consideradas, siendo n el número de casos y controles procesados en cada paso.

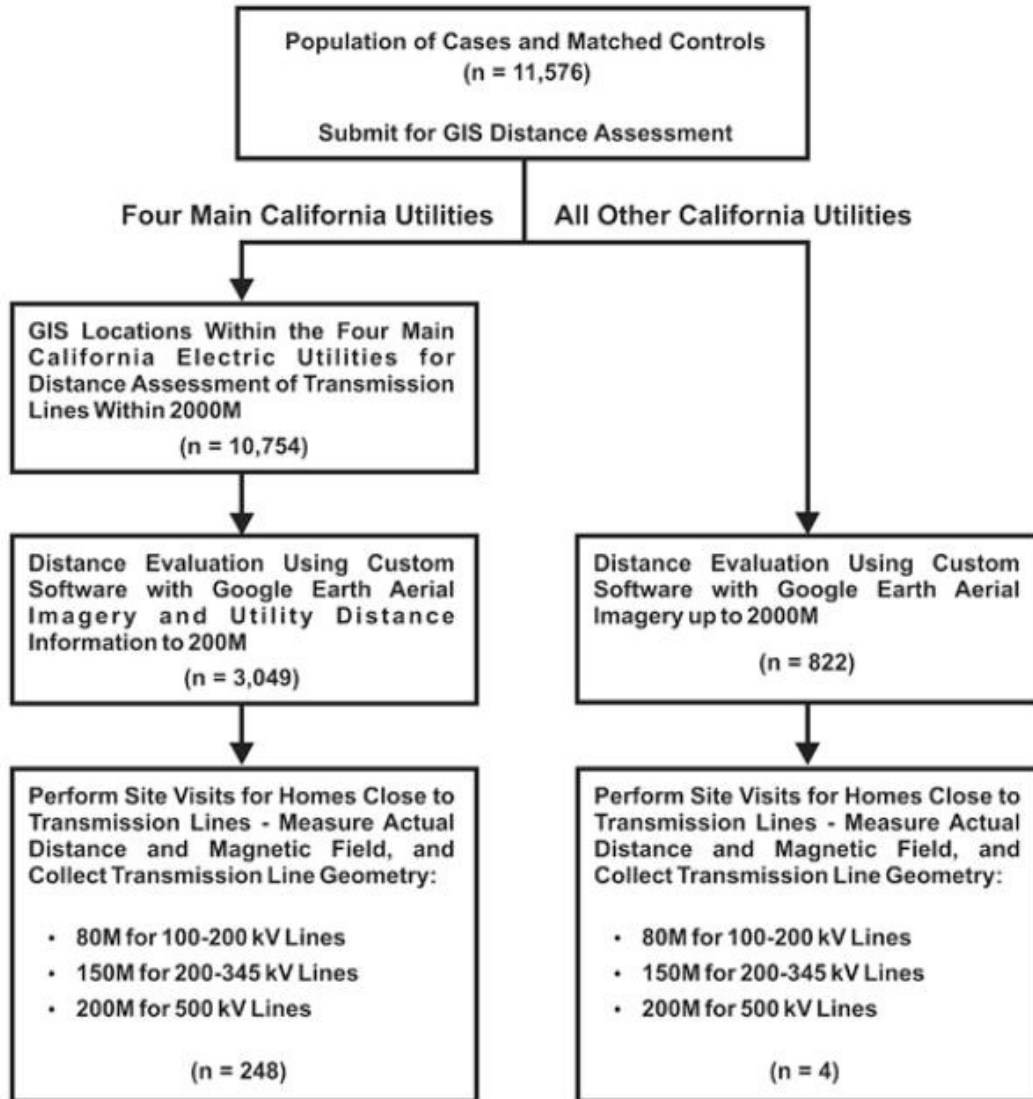


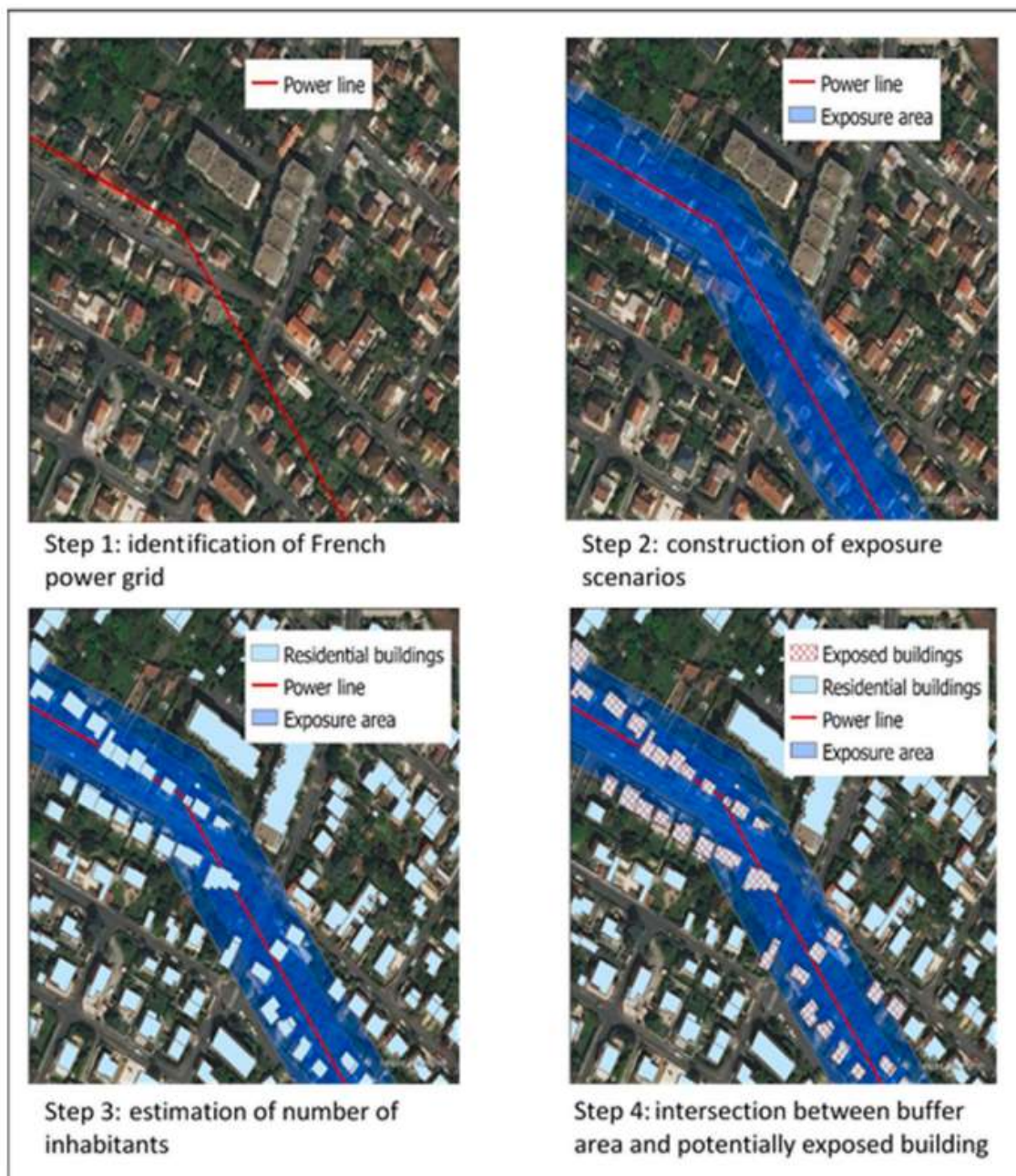
Figura 4. 3. Flujo de trabajo para la determinación de distancias mediante un SIG para un estudio epidemiológico de California. Fuente: Kheifets et al., 2015

La obtención de las coordenadas satelitales de domicilios también fue resuelta mediante mediciones directas en el sitio y mediante Google Earth en un estudio en las provincias de Módena y Reggio Emilia (Italia) (Malagoli et al, 2023). Además, ambos procedimientos se aplicaron también para la validación de la precisión de la geocodificación general obteniéndose errores inferiores a 1 m. Todas las direcciones

fueron integradas con los geodatos correspondientes a los 1125 km de redes eléctricas áreas y subterráneas mediante el programa informático ArcGIS 10.1.

Otra investigación a gran escala sobre la asociación entre la proximidad residencial a las líneas eléctricas y el desarrollo de tumores cerebrales en Francia se basó también en un Sistema de Información Geográfica (Carles et al., 2020). Mediante el software QGIS V2.14.3 (QGIS Development Team, Open Source Geospatial Foundation, 2009) los autores crearon dos métricas de exposición, una de ellas basada meramente en la distancia. Para ello, geocodificaron las viviendas con dos escalas de precisión: según los domicilios quedaban georreferenciados mediante su propia dirección o, cuando esta no estaba disponible, según la dirección del ayuntamiento del municipio o incluso de su iglesia. Estas tareas se llevaron a cabo mediante diversas bases de datos geográficas del Instituto Geográfico Nacional Francés y mediante el geocodificador en línea Avialab basado en Google Maps. De esta forma obtuvieron el geoposicionamiento para todas las direcciones, al menos a un nivel mínimo de municipio. Los mapas digitales de la red eléctrica y sus datos asociados se obtuvieron a partir de una base de datos geográfica y las diferentes líneas se clasificaron por voltajes y en aéreas y subterráneas, incluyendo ambas en el estudio y asumiendo su estabilidad temporal entre 1965 y 2013. Para calcular el puntaje de exposición de cada una de estas direcciones, primero determinaron las distancias a la línea eléctrica más cercana, a la línea de alta tensión más cercana (≤ 200 kV) y a la línea de muy alta tensión más cercana (> 200 kV), dentro de una distancia máxima de 50 m, considerando que en las viviendas situadas a mayor distancia la exposición era nula. Finalmente, para determinar la acumulación de exposición a CM de los sujetos de interés, se sumaron las duraciones según los lugares de residencia (< 50 m o no) durante su vida. Estos autores realizaron también una clasificación de las viviendas expuestas cuando se consideraba que en estas el valor del CM era igual o superior a $0.3 \mu\text{T}$, pero dicho valor fue establecido según datos recopilados de la literatura determinando la siguiente correspondencia para el umbral $\geq 0.3 \mu\text{T}$ y las distancias: 60 m a líneas de 63 kV; 80 m a líneas de 90 kV; 100 m a líneas de 150 kV; 150 m a líneas de 225 kV y 200 m a líneas de 400 kV.

Recientemente también se han aplicado los SIG para modelizar la exposición a CM mediante una propuesta de enfoque híbrido que combina mediciones de CM y distancias a la línea eléctrica (Deshayes-Pinçon et al., 2023). Para estimar el número de personas expuestas desarrollaron una metodología en cuatro pasos ilustrados en la Figura 4.4. El primero consistió en identificar las líneas eléctricas aéreas y subterráneas de la red



*Figura 4. 4. Metodología mediante un SIG para determinar la población expuesta a CM.
Fuente: Deshayes-Pinçon et al., 2023*

eléctrica francesa, para lo que dispusieron de una base de datos proporcionada por organismos nacionales que reflejaba el 99% de la red con una precisión planimétrica de aproximadamente 2 m. El segundo paso consistió en la construcción de corredores de diferentes niveles de exposición entorno a las líneas para lo que se basaron en valores de CM sobre esas líneas publicados por la empresa gestora de la línea (imagen superior drcha. de la Figura 4.4).

A partir de estos valores determinaron, para cada tipo de línea, las distancias a las cuales se amortiguaban diferentes niveles de exposición de interés, definiendo las distancias correspondiente mediante diversos modelos lineales. El modelado de los corredores de nivel de CM se llevó a cabo con el programa ArcGIS Pro2.6.0 mediante herramientas de áreas de influencia. Un análisis espacial posterior permitió identificar los edificios expuestos (imagen inferior drcha. de la Figura 4.4.) y finalmente calcular el número de habitantes dentro de cada corredor. Los datos tridimensionales de la línea y de las elevaciones relativas se consideró que quedaban recogidos de manera implícita en las mediciones de CM, si bien, en este trabajo se asumen generalidades puesto que puede haber zonas con características particulares donde se cumplan los valores de los corredores predefinidos.

4.2.2.2. *Validaciones del método de distancias*

Los procedimientos para la obtención de distancias sobre mapas analógicos, tomadas directamente en el sitio de interés y con Sistemas de Información Geográfica fue comparada mediante análisis estadísticos en una investigación al objeto de comprobar su precisión (Blaasaas & Tynes, 2002). Para esta investigación, la geocodificación de los domicilios fue facilitada por el SIG de la Autoridad Cartográfica de Noruega, con una precisión de 5 m para el punto central del edificio. Estos datos fueron integrados con los mapas de las líneas eléctricas, que a su vez presentaban una precisión de entre 10 m y 15 m para la mayoría de las zonas de estudio y así poder obtener los valores de distancias. Se obtuvieron buenos acuerdos entre las 101 distancias de viviendas tomadas in situ mediante una estación total y las medidas sobre mapas a escala 1:5000, pero la correlación fue moderada cuando estas medidas, en ambos casos, se compararon las obtenidas a partir del SIG. Estos autores argumentan como una posible causa que “pequeñas variaciones

en las distancias medidas pueden causar una gran variación en el nivel del campo magnético y, al menos para las medidas de SIG y mapas, solo hemos medido las distancias en dos dimensiones y la falta de la tercera dimensión (altura) también puede introducir errores de clasificación”. Otra causa pudo ser el punto de referencia de los domicilios, que varió de un procedimiento a otro. Mientras que las distancias SIG se obtuvieron desde el punto central del edificio, las medidas con instrumentos topográficos se realizaron a pie de calle desde la pared más cercana del edificio.

Este problema de geolocalización de las residencias puede agravarse en áreas urbanas dada la prevalencia de grandes construcciones con varias entradas. No obstante, a pesar de la posibilidad de clasificación errónea de la exposición basada en distancias SIG, en la investigación anterior comentada consideraron aceptables estos datos especialmente cuando la magnitud de los estudios no permite obtener valores de distancias de una forma asumible en cuanto a requerimiento de costos y tiempo. Estos autores refuerzan sus conclusiones referenciando a Rothman et al., (2014) que afirma que es posible asumir dicha falta de precisión en una investigación si sus resultados indican una asociación importante entre la prevalencia de la enfermedad estudiada y la proximidad a las líneas eléctricas.

Algunas recomendaciones metodológicas (Schüz et al., 2009) en estudios epidemiológicos de exposición a CM FEB incluyen la reconsideración del empleo de métricas sencillas de exposición como la distancia, ya que la estimación de la exposición realizada en base a la distancia pero asociada a datos históricos de carga de la línea, o bien determinada a partir de mediciones en el sitio durante un periodo temporal de al menos 24 horas han demostrado ser predictores más precisos la exposición (Maslanyj et al., 2009).

Sin embargo, son los estudios de validación propios de cada investigación los que determinan sobre una muestra si el sustituto de la exposición adoptado puede ser suficiente representativo de este y aplicarse sobre una población más grande. Dos estudios de exposición residencial a CM desarrollados en América del Norte validaron que los residentes que vivían a menos de 150 m de líneas eléctricas con voltajes superiores a 200 kV tenían una exposición promedio ponderada en el tiempo claramente mayor a los

campos magnéticos de frecuencia industrial en comparación con las personas que vivían a mayores distancias (Kavet et al., 1992; Levallois et al., 1995). Un estudio reciente realizado en California y Reino Unido (Amoon et al., 2020) evaluaron la relación entre CM calculados y CM estimados en base a la proximidad dentro de los 100 m a las líneas eléctricas y observaron que, en estas regiones, la distancia horizontal por sí sola representaba un indicador indirecto de la exposición y que podía considerarse válido.

Algunas limitaciones a las que se ha visto sujeto este predictor de la exposición es la dificultad para ubicar con precisión viviendas en edificios de varias plantas o grandes complejos residenciales. No obstante, es un inconveniente común a cualquier método de cálculo directo o indirecto basado en las distancias el que se atribuya la exposición de un individuo como la correspondiente a un punto georreferenciado y obviar la movilidad de este ya sea a pequeñas o grandes distancias a la línea.

Por otra parte, la distancia a las líneas puede ser representativa de los valores acordes de CM, pero al igual que ocurre con el método WL, la proximidad a las mismas puede tener asociados otros factores ambientales y socioeconómicos que puede interferir en los resultados de asociaciones de dicha proximidad con determinadas enfermedades (Swanson & Bunch, 2018). Esta consideración se ha visto reforzada por las conclusiones de alguna investigación en las que el riesgo de leucemia infantil no decrecía de forma monótona con la distancia, sino que entre los 100 y 200 m a las líneas era cuando alcanzaba una mayor prevalencia o este riesgo se hacía máximo a partir de los 200 m y no en distancias menores (Draper et al., 2005). Crespi et al., (2019) explican de forma clara que el problema no reside en la validez de la distancia como un proxy de la exposición, sino en su capacidad para revelar asociaciones de enfermedades con los CM de FEB, y lo hacen de la siguiente forma:

“Debido a que la distancia es un componente clave en la intensidad de los campos generados por las líneas eléctricas, la distancia a las líneas y los valores de campos magnéticos calculados tienden a estar altamente correlacionados, y los análisis que usan ambas métricas tienden a encontrar asociaciones similares con el riesgo de leucemia infantil. Por lo tanto, es poco probable que los análisis que se centran únicamente en los campos magnéticos o

únicamente en la distancia a las líneas resuelvan el problema de si una o ambas de estas exposiciones representan un verdadero factor de riesgo para la leucemia infantil.”

4.2.3. Niveles de CM calculados

Los estudios basados en cálculos determinan la exposición de los individuos calculando la intensidad de CM generado únicamente por las líneas eléctricas cercanas, pero sin tener en cuenta la radiación que pueda provenir de otras fuentes, como la propia instalación eléctrica de la casa. Este planteamiento está basado en el carácter vectorial de los CM, y que, por tanto, su valor total cuando se ven implicadas varias fuentes, se obtendría por la raíz de la suma de los cuadrados del CM generado por cada una de ellas. Esto se traduce en que basta que haya un campo ligeramente mayor que los demás para que el de valor más alto predomine de forma notoria. Así pues, es posible asumir que en las viviendas que están relativamente próximas a líneas eléctricas de transmisión y/o distribución, el campo magnético procedente de estas es el predominante y que el de las otras fuentes pueda despreciarse. Dado que el campo magnético decrece rápidamente con la distancia a la línea, en las viviendas suficientemente alejadas de estas, la aportación del CM de líneas eléctricas principales o secundarias apenas difiere del CM generado por el cableado existente dentro del hogar. En estas circunstancias, no es posible estudiar los posibles efectos de los CM generados únicamente por redes de transmisión y/o distribución (Swanson, 2008).

El método de CM calculados presenta las mismas ventajas que los otros métodos indirectos descritos en apartados anteriores: permiten incluir en el estudio un elevado número de sujetos y minimiza el riesgo de selección al no requerir la participación directa de la población. Si bien el código de cables ha sido considerado en algunos estudios como un predictor de la exposición residencial a CM temporalmente estable, el método basado en cálculos de CM a partir de series históricas de estos presenta además la capacidad de realizar estas estimaciones con una alta precisión (Bürge et al., 2017).

El cálculo de CM históricos en diversas viviendas requiere, además de los datos de funcionamiento históricos de la línea durante el periodo de interés para el que se quiere calcular la exposición, el modelado del entorno donde se encuentran. Para ello resulta

indispensable la consideración de los datos geométricos y geográficos relacionados con la línea eléctrica. Estos datos pueden diferenciarse entre aquellos propios de la línea eléctrica, como en aquellos otros necesarios para determinar la distancia entre el punto de cálculo y la línea que genera el CM estudiado. En la siguiente tabla (Tabla 4.3) se recogen los factores que deben ser considerados para el cálculo de los niveles de exposición a CM según estas dos agrupaciones descritas.

Datos geométricos propios de la línea eléctrica	Posición geográfica de las torres
	Trazado de la línea entre torres
	Altura de anclaje de los cables
	Separación horizontal entre anclajes de los cables
	Número de circuitos
	Configuración de las fases
	Parámetros de la catenaria <ul style="list-style-type: none"> • Peso • Elasticidad • Coeficiente de expansión térmica • Tensión de tracción • Temperatura (por calentamiento óhmico y por condiciones meteorológicas) • Longitud del vano • Elevación relativa entre las torres • Cargas mecánicas adicionales (sobrepeso por hielo, viento)
Otros datos para determinar la distancia	Posición geográfica del punto de cálculo (geocodificación de domicilios)
	Elevación relativa del punto de cálculo respecto a la línea eléctrica (topografía de la zona de estudio)

Tabla 4. 3. *Parámetros requeridos para el cálculo del nivel de exposición a CM FEB*

Desde hace varias décadas existen programas informáticos capaces de proporcionar valores de CM generados por líneas eléctricas de alta tensión con una precisión significativa, estando esta precisión sujeta a la calidad de los datos de entrada (Zaffanella et al., 1997). Cuando los estudios se centran en unas pocas líneas, es habitual disponer de especificaciones detalladas sobre los circuitos y sus características operativas. La dificultad estriba en que los estudios epidemiológicos sobre exposiciones residenciales a CM deben abordar grandes poblaciones y habitualmente se llevan a cabo sobre zonas territoriales de gran escala. Esto implica trabajar con un número de líneas eléctricas muy elevado y de diversas características, lo que dificulta el disponer información suficientemente precisa sobre las mismas. Cuando esta información no está disponible,

los investigadores se ven obligados a realizar aproximaciones que pueden distorsionar de forma significativa las estimaciones de exposición. Esto ha dado lugar a que existan en la literatura diversos diseños de estudios basados en este mismo método y que a fecha de hoy no exista un procedimiento estandarizado. Tampoco hay sido posible definirlo para las validaciones de los modelos de exposición a CM calculados a partir de cargas históricas, pues estos dependen de cada modelado.

4.2.3.1. *Modelado de datos de carga históricos de las líneas eléctricas*

Una de las primeras cuestiones en las que existe diversidad de enfoques es la resolución temporal de los datos de carga de las líneas. Esta viene determinada por el criterio del epidemiólogo dependiendo que quiera calcular la posible incidencia de una enfermedad en base a la exposición, determinando esta exposición como la recibida por el sujeto en el año en que se le diagnostica la enfermedad, desde su nacimiento, o desde su gestación, siendo estas las más habituales entre otros muchos periodos de tiempo posibles a analizar. Sin embargo, no siempre es posible disponer de los datos de carga para todos los años de interés. Además, debe tenerse en cuenta que las intensidades circulantes pueden cambiar en cualquier instante de tiempo su dirección dentro del mismo circuito e incluso entre circuitos de una misma línea, cambiando de paralelo a antiparalelo de manera que los CM que generan se amplíen o compensen parcialmente. Por tanto, los cálculos a partir de cargas históricas requieren datos precisos de estas que incluyen los signos del flujo de las corrientes con resoluciones temporales elevadas (Bürgi et al., 2017). Estos autores propusieron una técnica novedosa para el modelado de exposición a largo plazo de CM de FEB que consistió en una automatización del promedio temporal de las cargas mediante el método k-mean-clustering. El algoritmo k-means agrupa objetos en k grupos teniendo en cuenta sus características, determinando en este caso como objetos los datos de carga de la línea eléctrica estudiada. Estos fueron agrupados según valores similares, lo que permitió acelerar los cálculos de las intensidades de los circuitos de las líneas promediándolas con una alta resolución temporal.

También en el estudio epidemiológico más recientemente publicado, llevado a cabo en Eslovenia (Zagar et al., 2023) los CM se calcularon a partir de valores de intensidad de corriente registrados cada 15 minutos, pero en este estudio, el promedio

utilizado fue de tipo geométrico en periodos diarios, semanales, mensuales y totales estableciendo así diferentes caracterizaciones de la exposición.

Los datos de cargas históricas para el cálculo del CM en los estudios epidemiológicos más importantes que se han llevado a cabo hasta la fecha han sido facilitados por las propias empresas gestoras del sistema eléctrico, algunas de las cuales además han desarrollado programas informáticos para tal fin. Un ejemplo es la empresa Jutland-Funen Electricity Collaboration en Dinamarca (Olsen et al., 1993) que estimaron los datos de carga con la colaboración de personal experto. Estos valores de carga fueron promediados para el año de interés epidemiológico.

En Finlandia (Verkasalo et al., 1993), para los cálculos realizados por la empresa Imatram Oima Vy, los datos de carga se obtuvieron mediante simulaciones informáticas, mediante documentación existente y mediante estimaciones extrapoladas a partir de años completos, según la información disponible para cada año analizado, y la exposición acumulada se calculó a partir de promedios anuales.

En Suecia (Tynes and Haldorsen, 1997), fue la Universidad de Oslo quien desarrolló un programa informático para obtener la intensidad del CM partir de la raíz de la suma de los cuadrados de sus componentes vectoriales. Los datos de carga histórica se estimaron como el promedio anual de cargas máximas diarias o a partir de estimaciones realizadas por técnicos competentes si no existían datos.

En otro estudio llevado a cabo en Reino Unido (Swanson, 2008) los datos de carga disponibles eran únicamente para el pico de invierno, por lo que tuvieron que escalarlos para cada año de estudio en función de las demandas y así poder obtener los promedios anuales correspondientes. Estos promedios anuales fueron nuevamente escalados en base a un factor empírico basado en la distancia a las líneas eléctricas, al objeto de mejorar la precisión de las estimaciones. A partir de estos valores se procedió al cálculo del CM con el programa EM2 desarrollado por su servicio nacional de gestión eléctrica National Grid.

En Francia (Bessou et al., 2013), cuando los datos de carga no estuvieron disponibles se aplicó un factor de corrección basado en el consumo eléctrico general del

país y en la evolución de los niveles de tensión, obteniendo resultados fiables de CM calculados con la aplicación EFC 400.

Otros autores (Vergara et al., 2015) han aplicado modelos lineales mixtos para realizar las extrapolaciones para los años sin información, aplicando tres estrategias: un modelo sin tendencia temporal (cargas estables en el tiempo), un modelo de tendencia temporal logarítmica lineal de la carga de líneas con igual tensión, y un modelo de tendencia temporal particularizado para cada línea. Este último modelo obtuvo los resultados más dispares, por lo que los cálculos de CM se realizaron según datos obtenidos con las otras dos estrategias.

Los mismos autores, pero en otro estudio (Kheifets et al. 2015), afirman que la cantidad de años que es necesario modelar a partir de datos extrapolados, los cambios históricos en la geometría de la línea de transmisión de varios circuitos, especialmente la configuración de las fases, y las variaciones del flujo de carga podrían afectar la calidad del campo magnético histórico calculado.

4.2.3.2. *Modelado de datos geométricos intrínsecos de las líneas eléctricas*

Es habitual encontrar en estudios epidemiológicos en grandes poblaciones, que las empresas gestoras de las redes eléctricas del lugar de interés hayan suministrado datos sobre los apoyos: altura, anchura de cruceta, altura de anclaje de los cables, número de circuitos, distancia entre fases y configuración de las fases. Otros datos esenciales también facilitados son las localizaciones de los apoyos y, por ende, el de las líneas eléctricas. Son pocos los estudios que detallan si estos datos se consideran de forma individual para cada apoyo que necesita ser considerado en los cálculos de CM, lo que requiere un volumen de trabajo destacable o si recurren a generalizaciones que lo hagan más asumible.

Concretamente, dada la gran variedad de tipos de torres existentes en la red eléctrica nacional francesa, Bessou et al. (2013) agruparon las torres eléctricas por familias y las diferencias particulares dentro de estos grupos las minimizaron aplicando factores de corrección. Para cada familia definieron valores de referencia para cada parámetro geométrico. Estos valores se basaron en la frecuencia. Por ejemplo, las alturas

de anclaje de los conductores se establecieron en 27.8 m para voltajes de 400 kV, 22.4 m en 225 kV y 16.5 m para las de menor tensión. De igual manera se asignaron longitudes de vanos de 500 m, 450 m y 350 m respectivamente.

Estos datos de las torres son importantes porque inciden en los valores de CM de forma notable. En particular, la configuración de las fases, para unas mismas condiciones de carga de una línea eléctrica genera valores de CM muy diferentes ya que la caída del campo magnético puede estar determinada por el cuadrado de la distancia o el cubo de la distancia según dichas configuraciones. Por ejemplo, entre disposiciones de simetría plana y simetría central, a 50 m a la línea el valor del CM puede verse ampliado por un factor de 5. Cuando las fases no están disponibles, estas deben ser estimadas mediante técnicos expertos o bien deducirlas a partir de mediciones de CM realizadas en esas líneas donde es necesario determinar la disposición de las fases, buscando mediante simulaciones la que más se adecue a los valores de CM observados (Vergara et al., 2015).

4.2.3.3. *Modelado de la distancia a las líneas eléctricas*

La intensidad del campo magnético en un punto cualquiera del espacio generado por una línea eléctrica aérea de alta tensión dependerá de la permeabilidad magnética del vacío (μ_0), de la intensidad (I) de la corriente en sus circuitos, de la configuración de las fases y la separación entre ellas (g) y de la distancia entre el punto de cálculo y los conductores (r). Para la mayoría de las configuraciones “g” de una línea trifásica de doble circuito y a distancias mayores que la existente entre sus cables, la intensidad del campo magnético puede expresarse por la ecuación (5) (Kaune y Zaffanella, 1993):

$$B = \mu_0 I g / 2\pi r^2 \quad \text{para } r \gg g \quad (5)$$

De esta expresión se puede deducir que, en términos generales, la distancia tiene un peso en los valores de campo mucho mayor que los valores de corriente. La relación exponencial del CM con la distancia que, dependiendo de la disposición de las fases, puede tener órdenes del cuadrado, como en la expresión anterior, o incluso del cubo, determina la importancia de esta variable. Así pues, incluso en el escenario más optimista,

un error en el valor real de la distancia genera aproximadamente el doble de error en el valor de intensidad del campo magnético:

$$\delta B/B \approx 2 \delta r/r$$

Si se cuantifica con un ejemplo, solamente 3 metros de error en una distancia de 30 metros conlleva aproximadamente un 20% de error en la estimación del campo. Por otro lado, si la intensidad del campo magnético decrece con el cuadrado de la distancia esto da lugar a una rápida caída de los valores de dicho campo, que será más acusada cuanto más próximo se esté a la línea. Este entorno es el de mayor interés por ser donde se dan los mayores valores de exposición y donde también pueden darse los mayores errores en términos absolutos. En esta zona del entorno más cercano a la línea, la altura de sus cables influye significativamente en la distancia a esta.

Por tanto, las abstracciones bidimensionales de las distancias entre las ubicaciones en estudio y la línea eléctrica aérea pueden ser potenciales fuentes de error. Valores adecuados de distancia, además de la variación temporal de los flujos de carga de los circuitos de una línea, es un aspecto fundamental que considerar en la generación de modelos predictivos de exposición a CM de suficiente precisión para ser aplicados en epidemiología ambiental. Determinar de forma precisa la distancia conlleva, acotar claramente su componente vertical y horizontal, en particular, en el entorno más próximo a la línea, donde ambas pueden tener el mismo peso. A distancias muy alejadas, normalmente la componente horizontal es mucho mayor y la elevación relativa entre el punto de cálculo y la línea eléctrica puede despreciarse.

Un ejemplo muy claro de la influencia de la componente vertical de la distancia en los valores de campo se recoge en un trabajo llevado a cabo en zona altamente poblada en la ciudad de Kalamoun (Líbano) con líneas eléctricas aéreas situadas muy próximas a los edificios (Najjar et al., 2009). A partir de datos de carga reales de las líneas simulaban el campo magnético a 1 m, 10 m y 17 m sobre el suelo, según la altura de los edificios circundantes. También realizaron simulaciones para diferentes intensidades de corriente y configuraciones de fases al objeto de comparar los niveles de CM. Observaron como en las mayores alturas el CM tomaba valores mucho más altos, como es lógico al

incrementarse la proximidad a los conductores. Por ejemplo, para una intensidad de 320 A, a 1 m sobre el suelo se obtuvo una intensidad de CM de 1.84 μT , pero en la misma zona y a 10 m de altura obtuvieron hasta valores de 9 μT (4.5 μT en los balcones de las viviendas a esa altura), que ni modificando la configuración de las fases los rebajaron a un nivel de CM recomendado como seguro para la salud. En otras zonas analizadas, los valores para las mismas condiciones de carga pasaron de 1.46 μT calculados a la cota de 1 m a tomar incluso valores pico de 260 μT en cubiertas de tejados a 17 m. Por tanto, si las elevaciones relativas no son consideradas, los errores pueden ser de tal importancia que tergiversen los resultados de cualquier estudio epidemiológico.

La importancia de la determinación de distancias precisas entre los elementos de cálculo también ha sido reforzada por otros investigadores (Bürgi et al., 2019) que, en su propuesta de un modelo tridimensional para calcular la exposición a largo plazo, tuvieron en cuenta la influencia del terreno. A partir de un MDT derivaron las posiciones x , y , así como las alturas z de las bases de las torres y de los puntos de cálculo. Compararon además la precisión de las predicciones según dos MDT de diferente resolución, uno de 25 metros y otro más fino de 5 metros. Concluyeron que, en puntos cercanos al eje de la línea, la precisión de sus predicciones estaba fuertemente influenciada por la precisión del modelo del terreno utilizado, ya que los errores en las coordenadas z en el MDT afectaron de forma particular al modelado de la altura de los conductores y, por ende, a los valores de distancias. En puntos muy alejados de la línea, al tomar mayor importancia la componente horizontal de la distancia frente a la componente vertical, la precisión obtenida en estos valores de distancias no dependió tanto de la resolución del modelo digital de terreno de referencia.

Por otra parte, la propia definición de distancia conlleva determinar la posición relativa de los elementos entre los que se mide, que habitualmente son las viviendas (cuando se trata de estudios de casos y control). Por un lado, estas viviendas deben abstraerse en un punto concreto (o varios) a pesar de su naturaleza poligonal, cuando además no es posible determinar la ubicación de los dormitorios (si se considera esta la estancia donde más tiempo pasa el individuo). Por otra parte, los cables de la línea eléctrica describen una catenaria, y esto conlleva que, a pesar de conocer la altura de los

anclajes de los conductores, esta no corresponde a la altura de la línea a lo largo del vano, pues la elevación de cualquier punto de los cables depende de la flecha de la curva que describe la línea. Los estudios epidemiológicos, dada su dificultad, tienen que aplicar procedimientos para determinar con la mayor fiabilidad posible estos parámetros, que conllevan un elevado coste en recursos y dedicación, y/o asumir simplificaciones de la realidad que inevitablemente introducen errores, existiendo también diferentes diseños de estudio respecto a la definición del punto de cálculo y al modelado de la catenaria.

La determinación de las coordenadas horizontales del punto de cálculo en los domicilios difiere entre estudios, si bien sí existe un consenso para la coordenada vertical, establecida a 1 metro sobre el suelo. Este consenso viene determinado básicamente porque es la medida establecida en la normativa sobre el protocolo de toma de medidas de CM generados por líneas eléctricas de alta tensión y porque la mayoría de los casos y controles de los estudios epidemiológicos se focalizan en viviendas unifamiliares. Estas son las construcciones más habituales en los entornos de las líneas eléctricas de mayor voltaje, debido a que el crecimiento urbanístico de las ciudades tiene lugar hacia el extrarradio de estas que es donde se encuentran los trazados de las líneas eléctricas de transmisión y distribución. Además, algunas de las incertidumbres más importantes surgen cuando el sujeto vive en grandes complejos residenciales o en un piso de un edificio de varias plantas, lo que dificultaría enormemente concretar la localización de la vivienda dentro de este y además requeriría considerar la altura del piso, si bien esta última circunstancia suele ser más excepcional por los motivos urbanísticos expuestos anteriormente.

Mientras que algunos autores han definido la distancia de cálculo entre el centro de la vivienda y la línea horizontal imaginaria que representa el eje de los conductores (Verkasalo et al., 1993), otros han tomado como punto de referencia la esquina de la vivienda más cercana a la línea y han tenido en cuenta, además, la elevación relativa entre la casa y los conductores (Tynes and Haldorsen, 1997) mediante observaciones a pie de calle, aunque sólo para aquellas residencias a menos de 50 m a las líneas.

Swanson (2008) también tuvo en consideración las elevaciones relativas para las viviendas a menos de 50 m de las líneas eléctricas obteniendo todas las distancias

mediante medidas in situ y para estas viviendas, realizó los cálculos de CM en 5 puntos de la casa alejados uniformemente a la línea eléctrica para después obtener el total a partir de su promedio. Para las viviendas situadas a una distancia mayor, su ubicación se determinó a partir de rejillas de geocodificación de 10 m de resolución que generan un error promedio de 2.5 m que, para una casa a 50 m de la línea, podría conllevar un error máximo en los valores de CM del 10%. A otras distancias, el terreno era considerado plano y horizontal y no se tuvo en cuenta la altura de los cables.

Una mejora en este sentido fue realizada por Bessou et al., (2013) que además de prestar especial atención a la altura de los conductores en zonas a menos de 50 m de una línea de 400 kV, a menos de 40 m de una línea de 225 kV o a menos de 30 m para voltajes más bajos, para la estimación del CM en zonas situadas a otras distancias utilizaron valores habituales de alturas del cableado según los voltajes y para considerar la topografía del terreno, aplicaron un factor de corrección en aquellas zonas que existían pendientes pronunciadas, determinado con un modelo matemático desarrollado especialmente para este fin.

Otros investigadores (Vergara et al., 2015) han sido más restrictivos, posiblemente por los avances existentes en instrumentación de geoposicionamiento y toma de medidas, y seleccionaron los sitios a inspeccionar directamente si se encontraban situados a menos de 80 m para líneas de 100–200 kV, a menos de 150 m para líneas de 200–345 kV y 200 m para líneas de 500 kV. Estas distancias horizontales de las viviendas a las líneas fueron determinadas mediante un SIG. También utilizaron sistemas de posicionamiento global portátiles de alta precisión y telémetros láser para precisar los datos de altura, separación y hundimiento máximo de los cables, así como la distancia geométrica de las residencias respecto a las líneas eléctricas más cercanas. Estas distancias se midieron para el centro de la huella del edificio, pero cuando su ubicación no era del todo conocida, también se midieron para los puntos más lejanos y cercanos a la línea. Dependiendo de qué punto de referencia se asumiera como el más representativo, el porcentaje de viviendas clasificadas como altamente expuestas varió de un 2% a un 8%.

4.2.3.4. Evolución del modelado en el cálculo del CM. Aplicaciones de los SIG

Los primeros estudios epidemiológicos basados en SIG (Turgeon et al., 1998; Valjus et al., 1995) determinaron las distancias utilizando mapas a escala 1:20000 para georreferenciar las edificaciones y las instalaciones con una elevada resolución (1 m) y con una precisión de 4 m mediante el programa Computer Aided Resource Information Systema (CARIS) desarrollado por Univesal Systems Ltd. Las posiciones de las viviendas y de las torres, así como las alturas de los cables se volcaron desde un SIG a un programa informático de cálculo de CM desarrollado a tal efecto (CMASIG). Esto supuso una mejora en la determinación de las elevaciones relativas, ya que, a partir de estos datos, se pudo considerar en los cálculos una aproximación de las flechas de los vanos.

También los SIG se han aplicado con el propósito de generar representaciones gráficas territoriales de la exposición a CM, con el objeto de proporcionar más información sobre las zonas y la población altamente expuesta. En este caso los SIG no están dirigidos a la generación de los datos necesarios para el cálculo del CM, sino que estos son obtenidos mediante programas informáticos específicos para tal efecto. Por ejemplo, Najjar et al. (2009) generaron un SIG propio llamado ALTAS EMF con el apoyo de la Universidad de Balamad (Líbano) para generar los mapas correspondientes a diversos escenarios de cargas de las líneas y configuraciones de fases que habían sido simulados previamente con el programa EPRI RESICAL (Enerchet, USA). De esta manera, obtuvieron salidas gráficas de los niveles de CM en la zona urbana estudiada en un ancho de la línea de 50 m (Figura 4.5).

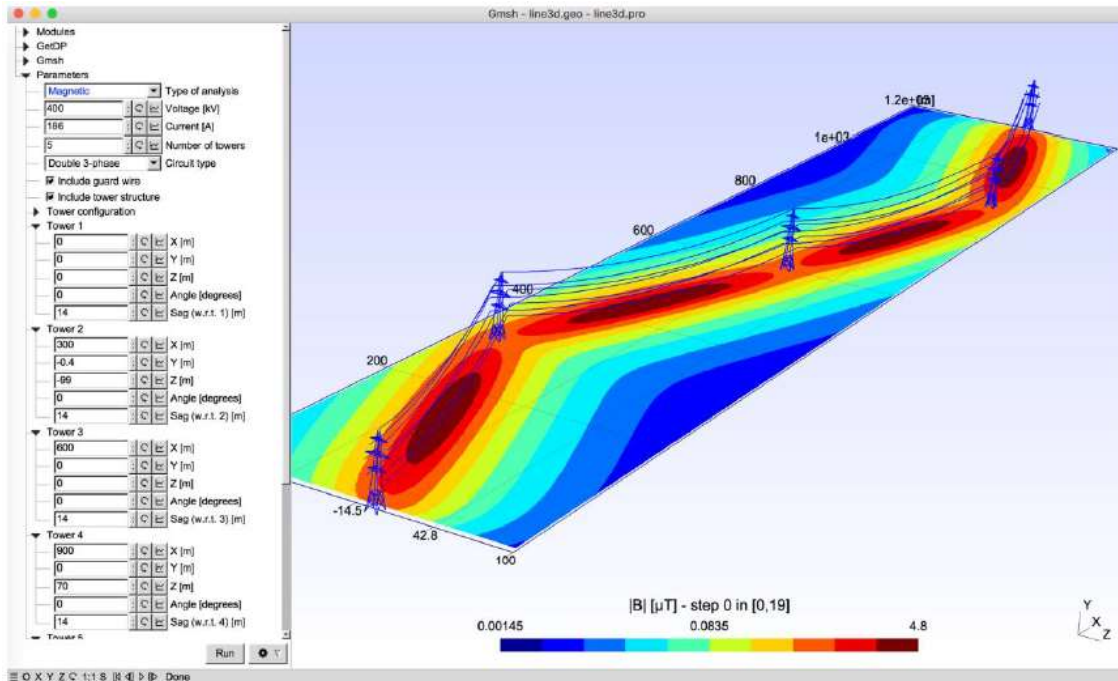
Otros investigadores (Wout et al., 2018) han ido más allá de la mera representación y han desarrollado una aplicación basada en el programa libre QSIG que permite generar directamente mapas de escenarios de CM personalizados según los parámetros de la línea eléctrica establecidos por el usuario. Este debe introducir los datos geométricos y de carga de la línea, así como los valores de CM máximo permitido, para que se redirijan a otras dos aplicaciones, también de código abierto, basadas en elementos finitos: una para efectuar los cálculos de exposición (GetDP) y un generador de malla tridimensional basado en sistemas CAD (Gmsh). Estos cálculos tienen en cuenta la ordenación de las



Figura 4. 5. Representación gráfica del CM mediante el SIG EMF Atlas. Fuente: Najjar et al., 2009

fases y la flecha máxima de los cables, y genera un modelado 3D de la línea eléctrica. Las zonas con mismo valor de exposición son representadas gráficamente mediante entidades poligonales (formato vectorial), tal y como puede observarse en la Figura 4.6, sin bien el relieve del terreno no es considerado en ningún momento ni a efectos de cálculo ni a efectos de representación.

Sin embargo, en los dos ejemplos anteriores de representaciones gráficas territoriales del CM se observa claramente el efecto del pandeo de la línea, que suele ser máximo en los puntos intermedios de los vanos siendo también aquí máximos los niveles de CM a nivel del suelo por encontrarse los cables en su punto más bajo. Se observa que esta diferencia puede ser significativa respecto otros puntos del vano, por ejemplo, en las proximidades a las torres, donde los cables se encuentran en su posición más alta respecto al suelo.



*Figura 4. 6. Representación gráfica del CM mediante aplicaciones integradas en QSIG.
Fuente: Joseph et al., 2018*

La consideración de las diferentes alturas de los edificios a efectos de cálculo del CM se ha llevado a cabo también mediante un SIG (Marín Granados, 2013). En el programa ArcGIS, mediante un script basado en la categorización del número de plantas de los edificios según el catastro oficial se extruyeron las huellas de los edificios. El cálculo del CM se realizó mediante la integración en otro script del método de cálculo basado en la expansión en series y una última función permitió calcular los anchos de afección de cada línea. Las salidas gráficas (Figura 4.7) se realizaron mediante ArcScene y permitieron modelar diferentes escenarios de carga, si bien, la metodología propuesta por su autor no incluye la consideración de la elevación del terreno y la altura de los cables es promediada a partir de los valores de anclaje. Los datos correspondientes a las alturas de las torres fueron obtenidas a partir de sombras sobre imágenes aéreas.

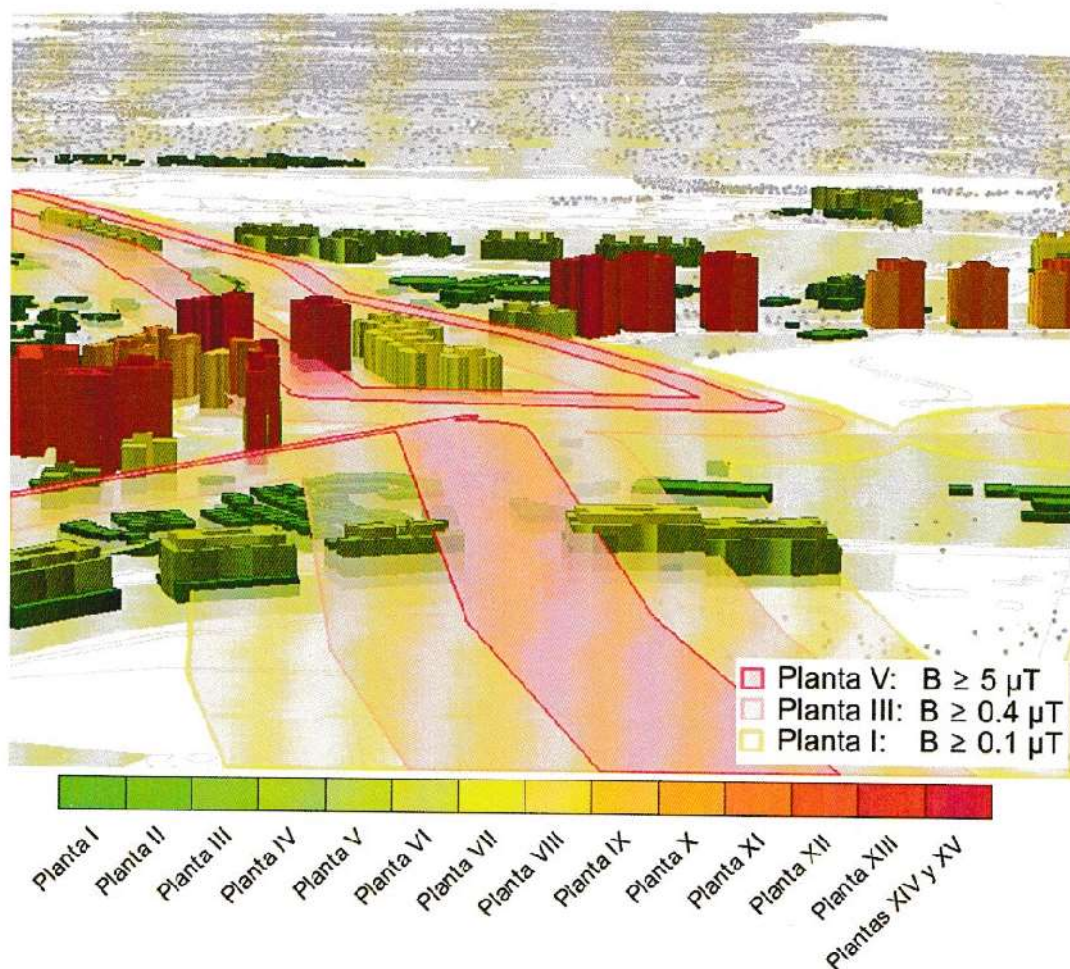


Figura 4. 7. Representación de tres áreas de influencia de niveles de CM según alturas de edificios. Fuente: Marín Granados., 2012

En zonas donde la topografía es muy irregular, el relieve del suelo repercute de forma significativa en los valores de elevación relativa entre el suelo y la catenaria y por tanto en las distancias, pudiendo dar lugar tanto a subestimaciones como sobreestimaciones de la exposición a CM calculada para las personas. El desarrollo de representaciones gráficas de los niveles de inducción magnética generados por líneas eléctricas aéreas de alta tensión que consideren el terreno fue trabajado por el Instituto de Física Aplicada “Nello Carrara” del Consejo Nacional de Investigaciones de Italia quienes desarrollaron el programa Phidel (Comelli et al., 2007). Este programa informático consta de dos módulos, uno de cálculo y otro consistente en un entorno SIG tanto para la preparación como la visualización de los resultados en formas de mapas. Para ello interpolaron una malla de puntos de valores de CM mediante el algoritmo del

inverso de la distancia (IDW) y así generar una superficie digital de valores de CM. Las salidas gráficas fueron bidimensionales, aunque la catenaria real es incluida en los cálculos mediante una discretización de esta en segmentos. Los archivos generados eran compatibles con el programa ArcView, tal y como se muestra en la Figura 4.8 donde se pueden apreciar diferentes niveles de CM calculados superpuestos a la cartografía.

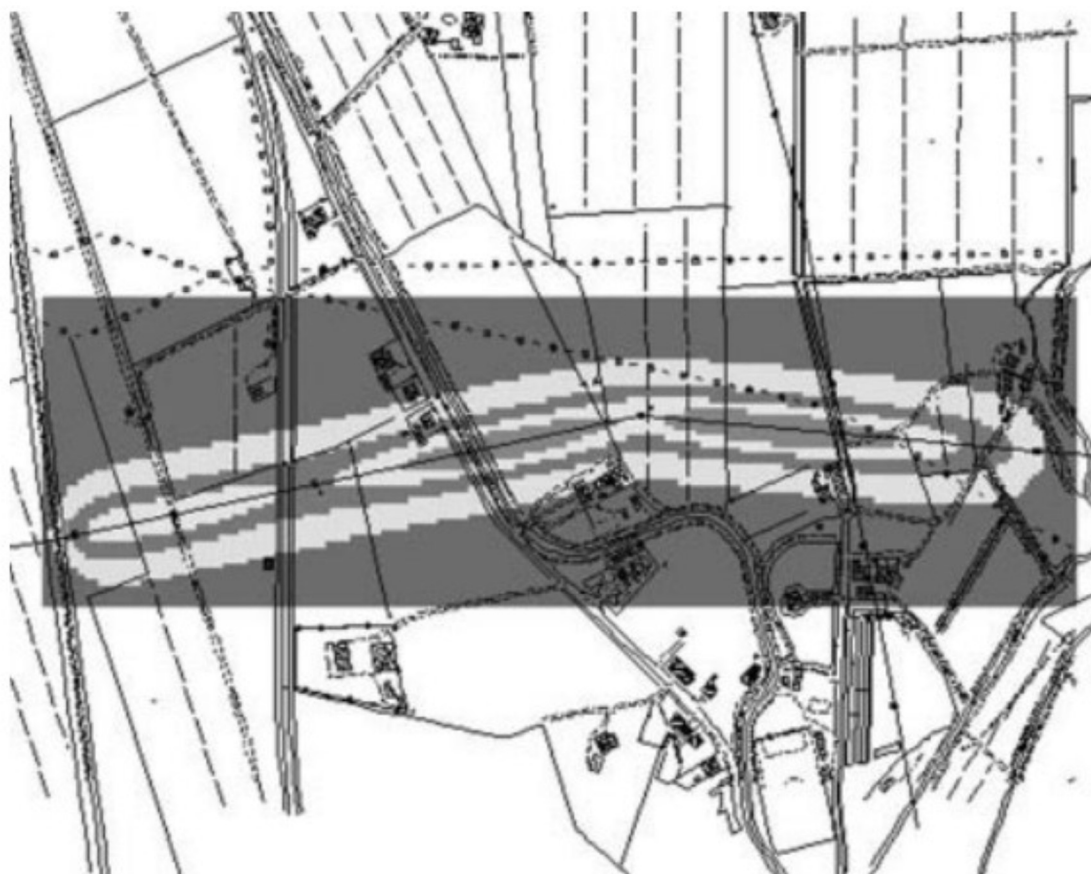


Figura 4. 8. Representación gráfica del CM mediante el programa PHIDEL. Fuente: Comelli et al., 2007

La consideración del terreno en el trabajo citado se aprecia con más detalle en la siguiente figura (Figura 4.9), en la que la imagen superior representa una zona mediante curvas de nivel y categoriza el terreno según cuartiles de altitud, datos con los cuales obtuvieron la imagen inferior, que representa las áreas con diferentes categorías de exposición a CM. No obstante, la calidad de las salidas gráficas era mejorable

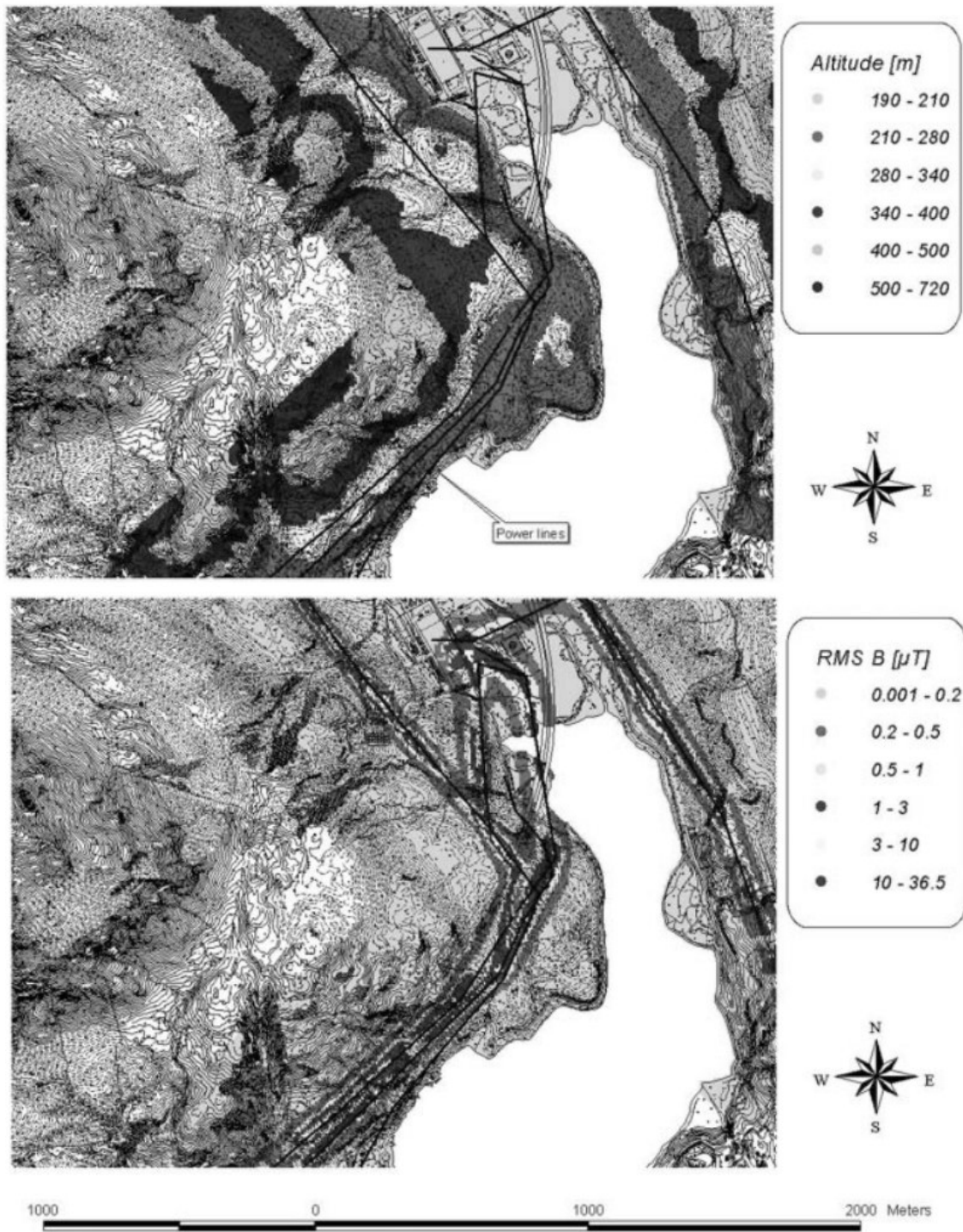


Figura 4. 9. Representación gráfica del CM considerando la altitud del terreno mediante el programa PHIDEL. Fuente: Comelli et al., 2007

Una profundización en el modelo tridimensional del CM sobre el territorio fue llevada a cabo también por el mismo organismo en un trabajo posterior (Comelli M. et al., 2008; Comelli M. & Zoppetti N., 2009). Concretamente, desarrollaron una aplicación

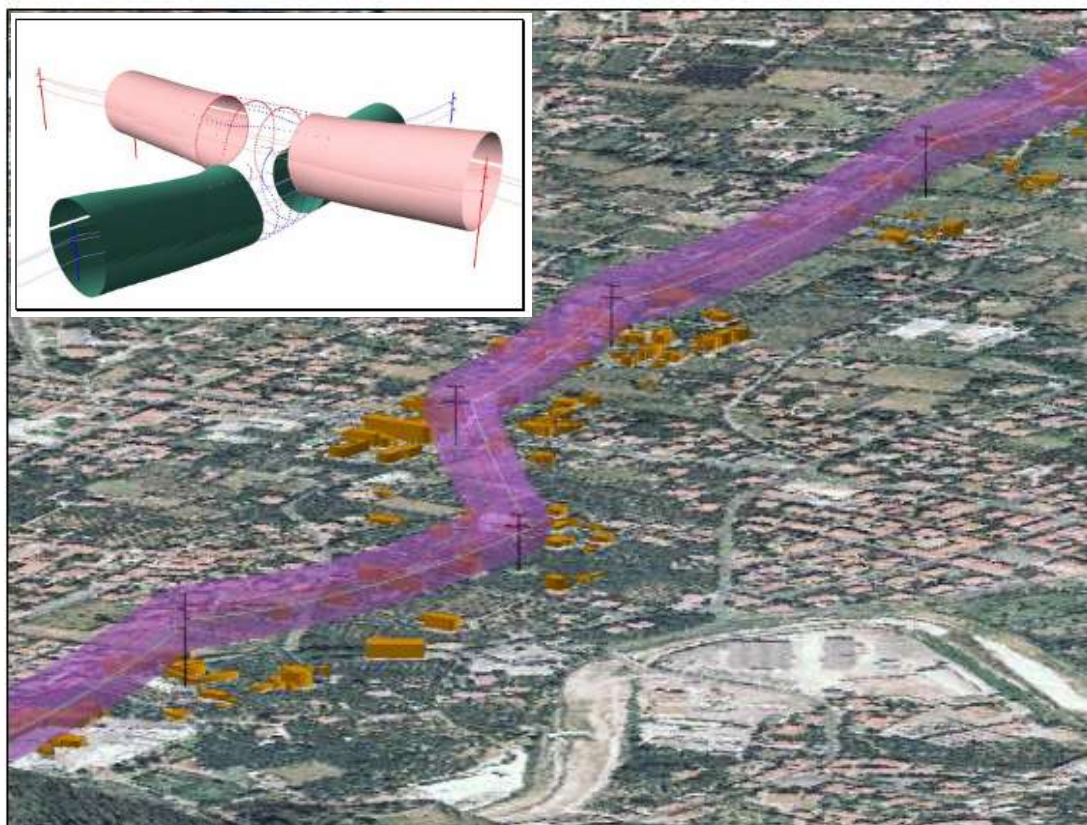


Figura 4.10. Representación gráfica 3D del CM mediante isosuperficies. Fuente: Comelli et al., 2008

capaz de generar, alrededor de las líneas eléctricas aéreas, isosuperficies o tubos de CM para los valores de CM establecidos por el usuario. Para poder visualizar los resultados en un entorno tridimensional, los datos de salida eran compatibles con ArcScene de ESRI (Figura 4.10). La intersección de estos volúmenes de CM con los edificios modelados también en 3D, permitía localizar de forma rápida edificaciones altamente expuestas. Aplicando herramientas de consulta espacial sobre una capa del censo de población, crearon un indicador para cada vano (Figura 4.11).

Este indicador se definió como la sumatorio de los productos del valor de inducción magnética por el número de personas expuestas para ese tramo de red. La tematización gráfica de las líneas eléctricas aéreas de 380 a 310 kV en función de este

indicador facilitó la localización de áreas críticas. Además, mediante herramientas del entorno de trabajo de ArcMap para la conversión de sistemas cartográficos de referencia y para la exportación a formato kml (Keyhole Markup Language), ampliaron los posibles entornos de visualización a Google Earth y a OSSIM Planeta.



Figura 4. 11. LEAAT clasificadas en diferentes colores según la afectación del CM sobre la población y edificios circundantes. Fuente: Comelli et al., 2008

Tras una comparación de las prestaciones de estos programas informáticos en las tareas de modelado 3D del CM, determinaron como solución más efectiva para el trabajo de oficina el uso combinado de ArcScene con Google Eath, dejando este último sólo para los trabajos de campo y así evadir los problemas de licencias conectadas a red que requería el uso del paquete ESRI. Esto aportó a los técnicos de la Agencia Nacional para la Protección del Medio Ambiente de la Toscana (ARPAT) además de una herramienta

de trabajo para constatar el cumplimiento de la normativa relativa de protección sobre la exposición a CM establecido en esa región, un apoyo útil durante las inspecciones “in situ” para verificar la adecuación de las simulaciones. Los parámetros geométricos y geográficos de las torres y de los cables, así como las distancias entre estos y los edificios circundantes, fueron medidos con equipos GPS y con telémetros láser. Determinaron que una de las principales fuentes de error fue debida a perfiles incorrectos de la catenaria entre torres eléctricas de tipo no estandarizadas.

En la actualidad existen procedimientos para generar cartografía de alta precisión de líneas eléctricas 3D gracias al desarrollo de la tecnología LIDAR. La compañía eléctrica nacional eslovena facilitó estos datos para modelar las LEAAT en uno de los estudios más recientemente publicados para la evaluación sobre el posible aumento del riesgo de leucemia en niños y adolescentes expuestos a CM FEB (Zagar et al., 2023). En los tramos donde no estaba disponible esta cartografía, las líneas eléctricas se modelaron a partir de otros datos proporcionados también por la misma empresa, como las coordenadas y alturas de las torres, la geometría de la cruceta, la flecha máxima y tensión mecánica de los cables obteniendo finalmente los casi 1000 km de líneas eléctricas áreas existentes en Eslovenia y unos 25 km de cables subterráneos.

El modelado tridimensional de cada línea permitió discretizarla en pequeños segmentos para calcular en cada ubicación deseada la inducción magnética de todos esos segmentos mediante la Ley de Biot-Savart y obtener así el efecto completo de todos los cables de una misma línea eléctrica. Para hacer más liviano el trabajo se agruparon los vanos con propiedades geométricas y de cargas similares y, de esta manera, se calcularon para cada grupo los CM según diferentes condiciones de carga de interés (carga máxima, carga nominal, cargas promediadas diaria, semana, mensual o anualmente).

Los resultados de CM se expresaron en forma de una malla ortogonal para todo el territorio de Eslovenia, formada por puntos espaciados 10 m, y la contribución del total en cada uno por los vanos más próximos, se resolvió mediante un algoritmo matemático desarrollado a tal efecto. En la Figura 4.12 se muestra la malla de puntos de 1 m de separación para dos líneas eléctricas diferentes (puntos en azul y negro) y en rojo se muestran los puntos de la malla final de 10 m de resolución a partir de la cual se generó

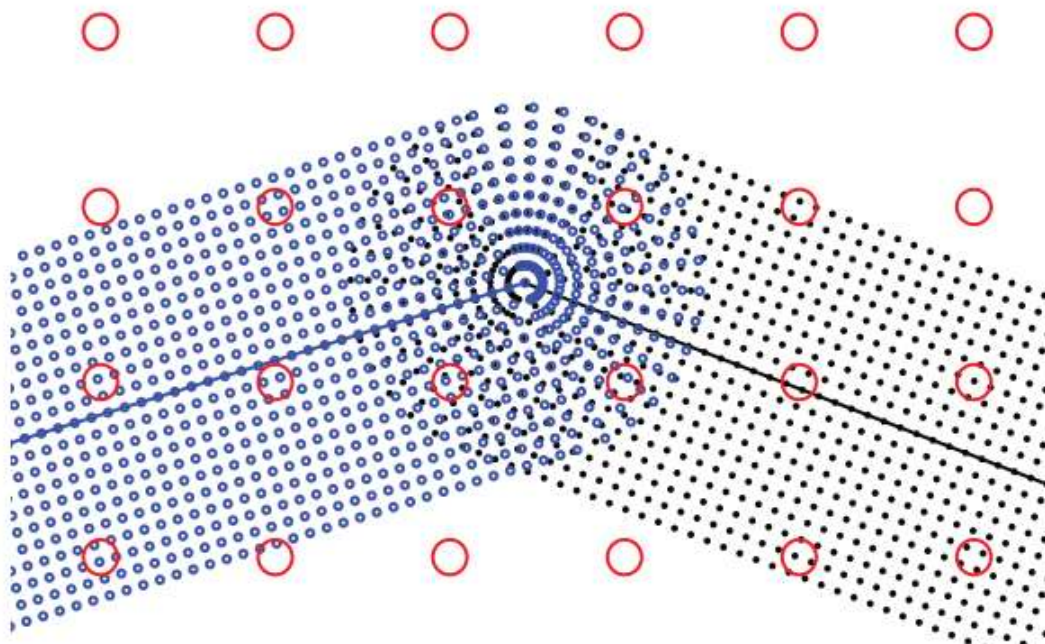


Figura 4. 12. Mallas de puntos para el cálculo del CM en Ljubljana (Eslovenia). Fuente: Zagar et al., 2023

la superficie de CM final mediante la agregación de los valores de CM de todos los puntos pertenecientes a las mallas de menor resolución (puntos rojos de la Figura 4.12). La dificultad de modelar el CM proveniente de varias líneas con trazado paralelo o cruzado se solventó calculando primero el CM de forma individual para cada línea y posteriormente agregándolos en un total para cada punto de cálculo. La elevación relativa se tuvo en cuenta extrapolando los valores de elevación a partir de un MDT de alta precisión.

En el modelado del CM resultante en el entorno de las líneas eléctricas que atraviesan parte del núcleo urbano de Ljubljana (Eslovenia) se puede observar la influencia de la flecha de los cables, así como el decrecimiento de la intensidad del CM en función de la distancia a la línea (Figura 4.13).

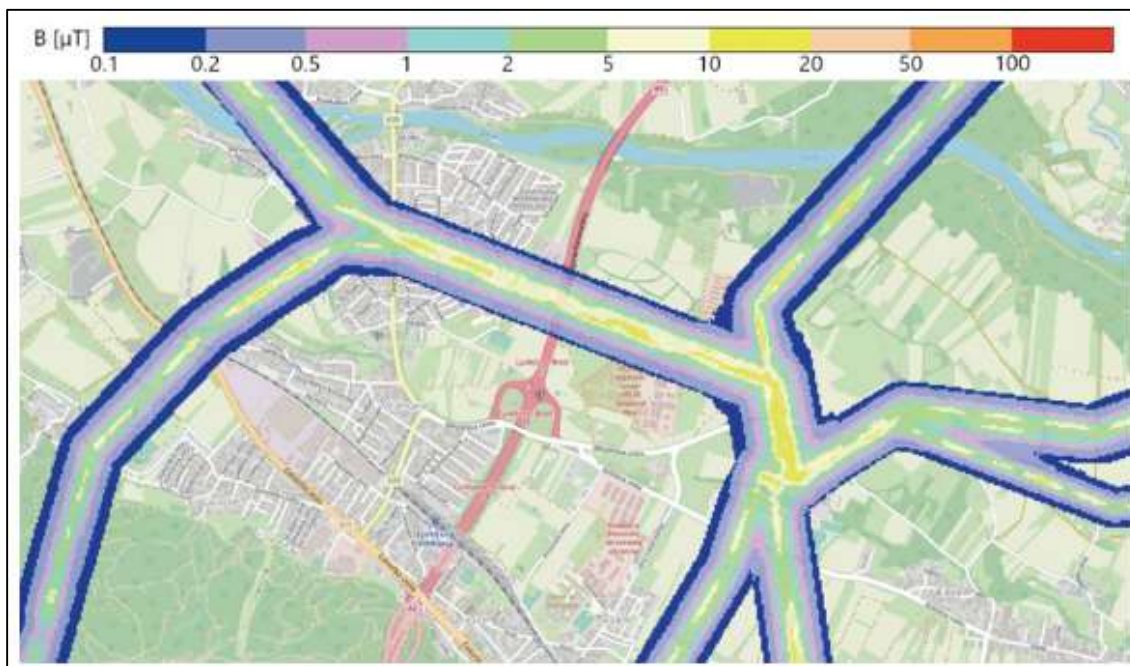


Figura 4.13. Representación gráfica de los niveles del CM en una zona de Ljubljana (Eslovenia). Fuente: Zagar et al., 2023

4.2.3.5. Consideraciones habituales para el cálculo del CM en estudios epidemiológicos

Los algoritmos utilizados por los programas informáticos para el cálculo del campo magnético están validados y no generan errores significativos, sino que como se ha visto apartados anteriores, la precisión de los cálculos depende de la calidad de los datos de entrada. Otro factor determinante en los resultados es el modelo de cálculo aplicado, en especial, cuando existen múltiples líneas eléctricas cercanas o donde los cambios de dirección de los vanos adyacentes en una línea eléctrica o entre varias que discurren próximas entre sí son importantes. Para obtener en un punto el valor total de la inducción magnética generada por varias fuentes cercanas es necesario conocer la fase relativa de los campos generados por las diferentes líneas eléctricas involucradas. Este valor de fase depende del equilibrio instantáneo de las cargas en los circuitos, que es un dato que no siempre está disponible para los investigadores. En esta situación, el cálculo del CM total puede solventarse de la misma manera que se agregan los campos magnéticos de una línea con varios circuitos, mediante la raíz de la suma de los cuadrados de cada CM (Swanson et al., 2008). Normalmente, la consideración de tres o cuatro vanos

a cada lado del punto de cálculo son suficientes para obtener valores precisos del CM de manera que puedan obviarse los demás vanos.

En estudios sobre grandes territorios la contribución de las líneas subterráneas no siempre es tenida en cuenta por diversos factores, a veces porque realmente no debe serlo (por encontrarse aislados) o simplemente por no ser factible desde el punto de vista metodológico (falta de datos, de recursos, etc.)

El efecto de la tierra por el reflejo en ella de los conductores tampoco es considerado en estudios de gran magnitud poblacional, debido a que la aportación del CM que generan los conductores imagen es muy pequeña en comparación con el CM directo. Al contrario que este campo, el efecto tierra se hace más notorio al alejarnos a la línea. Sin embargo, para valores típicos de una línea de transporte, esto puede generar errores de cálculo de entre un 5% y un 45% a un alejamiento de 350 m dependiendo de la resistividad del terreno (Cruz-Romero, 2000). Sin embargo, a estas distancias los valores de CM son los de ambiente.

Por un motivo similar tampoco se consideran las intensidades de secuencia cero. Esta corriente es debida al desequilibrio entre las fases, ya que la cantidad de corriente circulante por cada conductor varía debido normalmente a la impedancia. Los CM causados por esta decrecen también de forma inversamente proporcional a la distancia. Por tanto, a pequeñas distancias a la línea, el CM predominante es el derivado de la corriente de carga, si bien, en mayores alejamientos, la diferencia entre un campo y otro puede no ser significativa y repercutir con el mismo peso en el valor total del CM. A distancias inferiores a los 100 metros, la influencia de las corrientes desequilibradas es inapreciable, aunque a 300 m pueden representar aproximadamente un tercio del valor calculado, si bien como ya se ha comentado anteriormente, a estas distancias los niveles de exposición son relativamente bajos (Swanson, 1995). En cualquier caso, se debe tener presente que estos errores, por tener siempre la misma dirección, repercutirían en los resultados de valores del CM y, por ende, en los resultados estadísticos sobre la prevalencia de una enfermedad como un sesgo general y no de forma aleatoria entre los domicilios estudiados de un estudio epidemiológico. Por tanto, es habitual que se asuma

que las corrientes en los diferentes circuitos son simétricas, que todas las fases están desplazadas 120° y que tienen la misma amplitud.

Otras fuentes de CM externas a las viviendas y diferentes de las líneas eléctricas de transmisión y distribución no son tenidas en cuenta, por ejemplo, pequeñas estaciones transformadoras. Se trata de casos puntuales que requeriría disponer de esos datos o bien realizar visitas de reconocimiento del entorno de todos los domicilios involucrados lo que puede complicar enormemente cualquier proyecto.

En estudios sobre grandes territorios la contribución de las líneas subterráneas no siempre es tenida en cuenta por diversos factores, a veces porque realmente no debe serlo (por encontrarse los cables dispuestos de tal modo que el CM es insignificante) o simplemente por no ser factible desde el punto de vista metodológico (falta de datos, de recursos, etc.).

El problema de realizar estimaciones de exposición residencial a CM basándose únicamente en las LEAAT es que se ignoran otras fuentes de CM, incluso cuando se computan las corrientes de secuencia positiva, negativa y cero. Esto puede dar lugar a que se clasifiquen personas que realmente padecen una alta exposición como no expuestas. No obstante, en estudios epidemiológicos donde la prevalencia a la exposición y la tasa de incidencia de la enfermedad es baja, se debe poner un especial empeño en evitar los falsos positivos y así garantizar una alta especificidad (que las personas no expuestas se clasifiquen como tal) ya que puede ocurrir que, aunque haya pocos falsos positivos, se produzca un sesgo considerable hacia el nulo sobre prevalencia de la enfermedad. Aunque siempre es deseable una clasificación correcta de la exposición para todos los individuos, la sensibilidad (probabilidad que las personas expuestas se clasifiquen verdaderamente expuestas) es menos preocupante. Esto es porque si se obtuvieran falsos negativos, al surgir de un grupo de población pequeño, no tienen la misma capacidad de abrumar los resultados que los falsos positivos, que sí provienen de un grupo de población mucho más grande y que, por tanto, sí pueden llegar a mermar la capacidad representativa de la muestra de sujetos realmente expuestos.

En este sentido, de los diferentes factores que intervienen en el cálculo de la exposición residencial a CM, la distancia a las líneas eléctricas es crítica, y de forma especial, en el entorno de esta que donde más prevalece la exposición. Imprecisiones en los datos de carga afectarían a toda la población por igual. En cambio, la no consideración de la elevación relativa entre los elementos de cálculo solo tiene un efecto significativo en distancias cortas. Una de las simplificaciones más habituales es considerar el terreno plano y horizontal. En este caso, aunque fuera así, pero la altura de los cables no sea tomada en cuenta, se estaría sobrevalorando la exposición, pues se sitúan a los sujetos más cerca de la línea de lo que realmente están. Si se considera la altura de los cables, pero el terreno es idealizado como plano, los CM se verán sobre valorados y infra valorados según la elevación relativa entre el punto de cálculo y la línea eléctrica aérea.

Otra suposición habitual en estudios epidemiológicos que puede causar falsos positivos es asumir el punto de cálculo a 1 metro sobre el suelo aun cuando es bastante frecuente que en viviendas unifamiliares los dormitorios se encuentren ubicados en las plantas superiores (+3 m aproximadamente), siendo estas habitaciones de especial interés por ser donde las personas pasan mayor tiempo durante el día. Con este argumento, los resultados de CM se verían devaluados, pudiendo clasificar a los sujetos realmente expuestos como no expuestos, lo que conllevaría una reducción de la muestra de sujetos expuestos, si bien esta circunstancia, tiene menos capacidad de sesgar las estadísticas.

4.2.3.6. *Validaciones de los modelos basados en cálculos del CM*

Los estudios de exposición residencial a CM basados en cálculos de cargas históricas realizan validaciones de sus modelos propuestos al objeto de evaluar la precisión de las estimaciones y obtener información sobre las posibles fuentes de error. Para ello, se realizan comparaciones entre los valores de CM calculados en localizaciones concretas con los valores de CM registrados mediante instrumentos específicos en ese mismo sitio. Estos procedimientos de validación, así como los tamaños y distribución de las muestras de medidas difieren entre estudios pues son particularizados para cada uno de ellos.

La selección de sitios suele restringirse a aquellos donde se presume mayores valores de exposición, en un entorno de 200 m de la línea. Si además se pondera la incertidumbre de cada ubicación en función de los parámetros de cálculo más comprometidos (localización de las viviendas, datos de las cargas históricos y las fases), es posible obtener un análisis más exhaustivo y conocer el grado relativo de afectación de estas variables a la correcta clasificación. La concordancia entre los campos medidos y calculados es habitual determinarla mediante un análisis de correlación de Pearson. Si los datos no presentan una distribución normal, como puede ocurrir en los valores de CM, puede recurrirse a diferentes transformaciones geométricas y logarítmicas de los mismos para que cumplan con la suposición de linealidad de Pearson.

Dado que la finalidad de estos cálculos de CM es la clasificación de la exposición según determinados cuartiles de interés para los epidemiólogos, también se realizan análisis estadísticos para comprobar esta adecuación.

La normativa recomienda los procedimientos que deben respetarse para la toma de valores de CM generados por una LEAAT. No obstante, no existen un estándar para la validación de un modelo de exposición a CM, ya que tampoco existen estándares acerca de cómo debe ser modelada esta exposición. Por tanto, esta validación dependerá en gran medida de los principales desafíos que se haya tenido que abordar en cada estudio y de los recursos disponibles. Esto también puede determinar que, además de la validación general del modelo adoptado para el estudio epidemiológico en cuestión, se lleven a cabo validaciones intermedias que conciernen de forma particular a los factores que intervienen en el cálculo. Así pues, pueden distinguirse las siguientes validaciones las cuales han sido recopiladas a partir de diversos estudios epidemiológicos de exposición residencial a CM:

- Validaciones de los campos calculados a partir de datos de cargas conocidas.
- Análisis de correlación de diferentes modelos estadísticos para extrapolar los datos de carga desconocidos. La comparación entre los resultados

obtenidos con cada modelo puede aportar información sobre cuál tiene un mayor potencial predictivo de la exposición.

- Validaciones de las cargas extrapoladas, para lo que se comparan cargas conocidas en un periodo temporal con las cargas extrapoladas para ese mismo tiempo en el mismo modo que extrapolarían si no fueran conocidas.
- Validaciones de los campos calculados con independencia del origen de los datos (conocidos, extrapolados o supuestos).
- Validaciones de los campos calculados cuando los datos de las fases son desconocidos.
- Validaciones de las distancias de los domicilios a las líneas.

El número de observaciones (tamaño de la muestra) que se validan también difiere entre estudios y la localización de los puntos de la muestra de valores medidos se corresponde con los domicilios de casos y control en estudios epidemiológicos, mientras que en los estudios de tipo teórico sobre el modelado de la exposición a CM suelen distribuirse en perfiles transversales a las líneas eléctricas, aunque también pueden encontrarse muestras en ubicaciones aleatorias. No obstante, no se recoge de forma explícita que las separaciones de las localizaciones dispersas se hayan determinado de forma que eviten errores que pudieran ser sistemáticos y se garantice la independencia de estos.

En las publicaciones sobre los diseños de estudios epidemiológicos apenas se repara sobre la resolución temporal de las muestras para las validaciones de los modelos de exposición adoptados. Evaluar la exposición acumulada que se ha calculado para un sujeto durante un periodo de tiempo más o menos largo debería realizarse en base a una serie de medidas que abarcaran esa misma temporalidad o lo más asimilable posible. Debido a la dificultad que ello supone, en algunos estudios los valores medidos se comparan con los calculados únicamente con datos de carga de la línea correspondientes al día de la medición, al de la fecha de nacimiento y a la del diagnóstico (Vergara et al., 2014).

A pesar de las diferencias metodológicas entre estudios y la dificultad para validarlas, todos los estudios suelen obtener correlaciones estadísticas entre los datos medidos y calculados altas, con coeficientes de Pearson cercanos a la unidad. Sin embargo, no existen datos de estudios epidemiológicos que utilicen además otros indicadores estadísticos que permitan interpretar con más detalle los modelos que aplican.

4.2.4. Niveles de CM medidos

Los primeros estudios basados en medidas de la intensidad de campo magnético comenzaron a realizarse gracias al inicio de la comercialización, en la década de 1980, de los primeros instrumentos para la medición de campos de frecuencia industrial. En aquellas fechas, la investigación sobre la posible carcinogenicidad de los CM de FEB era un tema de especial interés debido a la asociación entre estos y la leucemia infantil encontrada por Wethermeier y Leeper (1979).

Como ya ha sido explicado en apartados anteriores, este y otros estudios con resultados similares estuvieron basados en métricas indirectas de la exposición residencial (la proximidad a la línea eléctrica y el código de cables) que no tenían en cuenta valores de CM, lo que suscitó un debate sobre la validez de estos métodos y por ende, de los resultados estadísticos de la prevalencia de la enfermedad que habían obtenido. Por tanto, al objeto de reforzar las investigaciones, muchas se llevaron a cabo clasificando a los sujetos expuestos mediante un método indirecto y otro basado en medidas directas de los valores de intensidad de CM (Tynes y Haldorsen, 1997).

Las medidas directas se abordaban según las posibilidades dentro de cada estudio como mediciones puntuales, mediciones a largo plazo en una ubicación fija y mediciones personales.

Las mediciones puntuales en el tiempo se llevan a cabo en el interior de las viviendas, siempre a 1 m sobre el suelo y tienen una duración de apenas escasos segundos. La ubicación concreta para la toma de medidas puede variar, habiendo estudios que las realizan únicamente en el dormitorio, bien en su centro o en la cama, y otros que utilizan la media aritmética de las medidas puntuales realizadas en el centro de diversas estancias de cada domicilio (cocina, sala de estar y dormitorios) además de la puerta de entrada.

Sin embargo, este método sólo contempla valores de CM en un instante de tiempo y no pueden captar de ninguna manera los cambios a lo largo del tiempo, ni sus fuertes variaciones diurnas o las exposiciones máximas diarias (Miller & Green, 2010). Al objeto de mejorar esta técnica surgieron las estimaciones de la exposición residencial basadas en medidas a largo plazo en los que los registros de medidas se realizaban durante periodos mucho más largos, siendo lo normal 24 h para poder captar las variaciones diarias, llegando a realizarse mediciones incluso durante 72 horas o una semana. Las estimaciones de exposición residencial a CM mediante medidas a largo plazo en una ubicación fija suelen desarrollarse instalando el dispositivo de medida próximo a la cama del niño, registrando valores de intensidad durante 24 h, normalmente en periodos de unos 30 segundos, dependiendo del instrumento utilizado. La determinación del tiempo transcurrido por las personas en las diferentes habitaciones de la casa se realiza mediante encuestas previas a la toma de medidas. Está ampliamente aceptado por la comunidad científica que el dormitorio es la habitación donde los niños pasan más tiempo al día, aproximadamente un 44% (IARC, 2013).

No obstante, este patrón de comportamiento puede diferir entre personas. En un estudio (Friedman et al., 1996) donde se compararon medidas basadas en dosimetrías personales con las medidas de 24 horas en los dormitorios encontró que estas eran muy similares para niños menores de 9 años, pero no tanto para niños más mayores. Hay que considerar también que las mediciones basadas en una ubicación fija durante todo el día captan la exposición de fondo por el funcionamiento de los electrodomésticos existentes en el hogar, y que, por tanto, no afectan a las personas durante las horas que no se encuentran en sus casas o afectarles otras totalmente distintas. De hecho, un gran número de estudios basados en mediciones, ya sean registradas en el sitio o mediante dosímetros personales, han tenido como objetivo investigar otros tipos de exposiciones diferentes a la residencial, como son el entorno laboral, los colegios o incluso los medios de transporte. Todos ellos son lugares donde también las personas pasan un tiempo significativo de sus vidas, por lo que deben ser considerados si se quiere realizar una evaluación precisa de la exposición acumulada. Respecto a la exposición en centros escolares, aunque existen estudios que han confirmado que los valores de CM de FEB en las aulas son menores que en los hogares (Decat et al., 2009; Kaune et al., 1994) siguen

desarrollándose investigaciones en este sentido (Park et al., 2020) para cuantificar la exposición de los menores en este ámbito.

Así pues, otro desafío en la evaluación de la exposición ha sido cuantificarla considerando la movilidad diaria de los individuos mediante dosímetros portátiles personales. Los dosímetros personales consisten en un sensor de campo magnético que es llevado por la persona, normalmente a la altura de la cadera mediante un cinturón o en el caso de estudios con niños, en la mochila escolar. La forma de trabajar de estos dispositivos es similar a los fijos, pudiendo también registrar valores cada pocos segundos en largos periodos de tiempo que suele establecerse en un día completo o dos. La principal desventaja de este procedimiento es que puede verse influenciada por un cambio en el patrón de comportamiento del sujeto que porta el dispositivo, y que, por tanto, disminuya la representatividad de la verdadera exposición. El monitoreo personal se ha llevado a cabo tanto en estudios con adultos (Lewis et al., 2015, 2016; Mezei et al., 2006) y niños (Karipidis, 2015; McBride et al., 1999).

Con el propósito de determinar qué método basado en mediciones cuantifica mejor la exposición de las personas a los CM, se han llevado a cabo numerosos estudios, si bien las conclusiones no han sido determinantes. En general, la evidencia ha mostrado una importante asociación entre las mediciones personales con las realizadas en el hogar, por lo que las mediciones personales son consideradas un cuasi estándar de la exposición personal (Swanson et al., 2019). Uno de los primeros estudios comparativos fue realizado en 1994 y determinaron que las mediciones de exposición personal puntuales no eran sustitutos eficaces de las exposiciones pasadas ni futuras, pero que sí lo eran las medidas a largo plazo, así como el promedio ponderado en el tiempo (TWA) de las medidas puntuales en el dormitorio (Kaune et al., 1994).

Otro estudio comparativo determinó también como mejor predictor las mediciones de 24 horas en el dormitorio, así como en la habitación más habitada (Schoenfeld et al., 1999). Posteriormente, en un estudio similar realizado en Escandinavia (Eskelinen et al., 2002) y en Italia (Liorni et al., 2016), determinaron que las medidas puntuales tomadas en los dormitorios mostraban una mayor correlación con las

mediciones personales que las medidas promediadas en toda la casa, si bien cualquiera de estas medidas puntuales se consideró representativa de la exposición personal.

Sin embargo, en uno de los trabajos más completos en este sentido llevado a cabo en ocho sitios diferentes de EE. UU. (Rankin et al., 2002), en el que las medidas se obtuvieron en cuatro visitas a los domicilios en un transcurso de tres años, no obtuvieron diferencias significativas entre los diferentes métodos directos. También una revisión sistemática de la literatura indicó que los niveles de exposición promedios diarios en el dormitorio del niño eran buenos indicadores de la exposición personal dado que mostraron una buena concordancia con las mediciones personales (Schüz et al., 2016).

Los métodos basados en registros a largo plazo generan un elevado número de valores de CM a partir de los cuales pueden obtenerse diferentes estimadores de la exposición. Los estimadores determinados más habitualmente son las medias ponderadas en el tiempo (TWA), la media aritmética, la media geométrica, la mediana, así como desviaciones estándar, aunque también hay investigadores que han evaluado la exposición mediante el porcentaje de tiempo de exposición por encima de un valor concreto de la intensidad de campo magnético o según diferentes cuartiles de exposición. En un estudio conjunto realizado en Suiza e Italia (Struchen et al., 2015) las medidas geométricas medias de los dormitorios mostraron una buena correlación con la exposición media geométrica personal y ambas indicaron una alta reproducibilidad temporal. En Bélgica (Decat et al., 2009), la mediana ponderada en el tiempo de las medidas personales fue el mejor estimador de la exposición infantil real si bien no hubo diferencias entre la mediana y la media geométrica de la exposición.

Los enfoques basados en medidas directas, sea cual sea, tienen en cuenta cualquier fuente de exposición. Esto se ha considerado una ventaja ya que no sólo recoge valores de inducción magnética originados por líneas eléctricas, sino el total procedente de cualquier fuente a la que esté expuesta la persona en estudio, mientras que un método basado en cálculos solo contempla la inducción generada por líneas eléctricas aéreas y/o subterráneas. Sin embargo, esto conlleva que no sea posible identificar de forma clara la intensidad del campo magnético generada por cada fuente ni considerar por separado todas y cada una de ellas.

Algunos investigadores (Ois Clinard et al., 1999) evaluaron la diferencia entre medidas interiores realizadas en los dormitorios durante 30 minutos y medidas puntuales exteriores de las viviendas. Concluyeron para la muestra de viviendas francesas analizadas, que ambos tipos de medidas solamente podían asemejarse en entornos rurales y pequeñas poblaciones, pero que en núcleos urbanos existían fuertes distorsiones debidas a fuentes imprecisas de CM no cuantificables.

Otra debilidad asociada a estos medidores es que, si bien pueden aportar una valiosa información sobre la exposición actual a CM FEB, las mediciones no tienen por qué proporcionar realmente información histórica, ya que hasta las mediciones de 24 o incluso 72 horas realmente representan una exposición contemporánea y por tanto quedan cuestionados como predictores estables de la exposición acumulada por las personas en el pasado, clave en estudios epidemiológicos. En estudios realizados con niños, la temporalidad de la exposición es un factor especialmente sensible ya que requiere acotar el nivel de exposición en el periodo de tiempo etiológicamente relevante, pudiendo tener este periodo una horquilla estrecha debido a la corta edad de los sujetos, y las medidas realizadas en otro momento pueden no ser representativas del periodo real de interés. Por ejemplo, Baris et al., (1999) determinaron que la exposición histórica de un individuo no puede determinarse de forma precisa a partir de las mediciones registradas en un sólo domicilio si este no ha sido su única residencia. En otro estudio llevado a cabo monitoreando personalmente a cerca de 1000 niños franceses durante un día entero (Magne et al., 2017) concluyeron que la exposición promedio de cada niño presentaba patrones muy diferentes a la nocturna y que la disparidad de dichos patrones conllevaba una elevada dificultad de crear a partir de ellos algoritmos capaces de predecir la exposición, lo que ponía en entredicho la evaluación de la exposición a partir de medidas en algunos estudios epidemiológicos.

Los estudios epidemiológicos basados en estos enfoques pueden verse comprometidos debido al sesgo de selección. Los casos y controles pueden verse afectados por una baja participación, pues requieren una colaboración estrecha de las personas implicadas lo que se dificulta aún más si el trabajo se realiza con menores. También este sesgo se ve influido por una participación diferencial, debido a la

consecuencia inevitable de que los potenciales participantes sean conocedores del objeto del estudio y su afectación personal tanto por la condición de la exposición como de la enfermedad (Mezei & Kheifets, 2006).

En la aplicación de estos métodos no se utilizan técnicas de representación gráfica. Apenas pocos investigadores (C. Y. Li et al., 2007) han utilizado instrumentos topográficos para medir la distancia entre las residencias donde se miden los valores de CM y las instalaciones eléctricas cercanas (centrales eléctricas, las líneas de transmisión y distribución, transformadores, etc.) al objeto de tener más información que permite una mejor interpretación de los campos medidos.

4.3. Conclusiones del capítulo

La cuantificación de los niveles de exposición de las personas a CM FEB es requerida en la mayoría de los países para comprobar que se encuentran dentro de unos límites establecidos por cada uno de ellos como seguros para la población en general. Esta cuantificación resulta especialmente compleja, lo que se intensifica cuando además se trata de realizar estas estimaciones para toda una población. Si además el objetivo es determinar en función de estos niveles la prevalencia de una determinada enfermedad, cuando esta prevalencia es muy baja y los niveles de exposición pueden variar enormemente con resoluciones muy pequeñas, resulta imprescindible definir dichos niveles de exposición a CM con la mayor precisión posible.

A lo largo de las décadas se han propuesto diversos métodos para caracterizar la exposición, los cuales se han ido implementando según la tecnología disponible siendo los Sistemas de Información Geográfica una herramienta fundamental en el desarrollo de las metodologías de exposición a CM ya que han permitido abordar con mucha mayor eficiencia los estudios epidemiológicos, facilitando la inclusión de muestras de estudios de casos y control mucho más amplias. Además, han mostrado que pueden proporcionar análisis de la afectación territorial y poblacional, así como obtener representaciones gráficas 3D de alta calidad que facilitan la comprensión y evidencian de manera mucho más clara el alcance de los resultados.

Las mayores incursiones de los SIG se han mostrado en estudios basados en cálculos de la intensidad del CM, siendo este método de caracterización de la exposición uno de los considerados como mejores predictores de la exposición de las personas en un momento puntual o durante un periodo relevante de sus vidas. El cálculo preciso del CM para estimar estos niveles de exposición requiere además de datos de carga y geométricos de las líneas eléctricas estudiadas, la determinación de distancias precisas entre los puntos de cálculo y la línea lo que a su vez exige la consideración de las sucesivas catenarias formadas por la línea y de la elevación del terreno que diversos trabajos han mostrado que pueden ser modeladas mediante un SIG.

No obstante, abordar grandes poblaciones, requiere simplificaciones de la realidad normalmente llevada a cabo mediante generalizando datos geométricos de la línea y mediante la consideración parcial del terreno. Las distancias medidas en dos dimensiones puede introducir errores importantes en la cuantificación de estos campos, siendo la distancia un factor de especial peso en el cálculo del CM que, además, los errores en su estimación tienen una influencia individual para cada domicilio estudiado pues depende de su ubicación relativa, pudiendo alterar la sensibilidad y la especificidad de las muestras. Por tanto, la consideración de datos del terreno de alta precisión y el modelado preciso de la línea eléctrica resultan aspectos claves en estudios epidemiológicos de exposición residencial a CM FEB, de manera particular en el entorno más próximo a la línea.

Por último, se ha podido observar que las validaciones de las diferentes caracterizaciones de la exposición para grandes estudios carecen de un método estandarizado, y normalmente vienen dadas únicamente mediante valores de coeficientes de correlación, faltando otros indicadores que permitan una mejor interpretación de la confiabilidad de las estimaciones.

5. ANÁLISIS DEL ERROR DE LA SIMPLIFICACIÓN DE DISTANCIAS A LEAAT MEDIANTE UN SIG 3D

5.1. Introducción

5.1.1. Justificación

Como se ha visto en capítulos anteriores, un número importante de estudios epidemiológicos sobre la exposición residencial a campos magnéticos utilizan la distancia a las líneas eléctricas aéreas más próximas como único parámetro para caracterizar dicha exposición.

Independientemente de la controversia existente en la literatura acerca de la validez de la distancia como un predictor adecuado de la exposición residencial a CM, y de que este concepto de distancia pueda tener como objetivo en algunos estudios englobar, además de este CM, otros posibles factores de riesgo para la salud tanto ambientales como socioeconómicos asociados también a vivir en la proximidad de las líneas eléctricas, asumir una abstracción bidimensional de la distancia entre las ubicaciones de estudio y el tendido eléctrico podría conllevar errores importantes en la categorización de la exposición. Si se quiere categorizar un riesgo en función de la distancia a la fuente, y más aún cuando la prevalencia del riesgo es muy baja, esta distancia deberá ser definida con la mayor exactitud posible.

Algunos estudios han investigado la consideración de la altura del conductor en la precisión del cálculo del CM (Cruz-Romero, 2000; Kostyszyn & Miśków, 2022) pero siempre con condiciones de un entorno ideal en el que no existen desniveles en el terreno y este es completamente plano y horizontal. Dado que estas condiciones no tienen por qué ser las habituales, el cometido de este trabajo consistió en analizar en una zona residencial real con una tipología urbanística, vegetación y orografía variable, el error que podrían cometer algunas simplificaciones de distancias adoptadas habitualmente en estudios epidemiológicos, abordando así unos de los objetivos propuestos en esta tesis doctoral. Para ello, dado que desde la última década se encuentran disponibles modelos digitales del terreno de alta precisión y los Sistemas de Información Geográfica

incorporan potentes herramientas de modelado y análisis espacial 3D, se desarrolló mediante estas tecnologías una metodología para estimar dichos errores.

Esta metodología se basó en la generación de un modelado tridimensional de la línea eléctrica aérea de alta tensión y del terreno circundante para obtener una superficie de distancias geométricas precisas entre el suelo y la instalación, que constituiría la superficie de referencia, y permitirá examinar tanto el error al simplificar las distancias reales a las líneas eléctricas por otras conceptualizaciones de la distancia más sencillas, así como representar gráficamente su afectación territorial en toda la zona de estudio.

5.1.2. Tipos de distancias analizadas

En todos los estudios basados en la distancia como un sustituto de la exposición, se asume esta como la distancia horizontal a la línea eléctrica considerando además que el terreno es completamente plano en toda la zona de estudio. Sin embargo, aunque todos los puntos del suelo estuvieran a la misma altitud, lo cual rara vez ocurre, los cables de la línea eléctrica siempre tienen una altura variable a lo largo de cada vano que será función de la catenaria que describan. Por lo tanto, la distancia relativa real entre un punto cualquiera del terreno y la línea eléctrica aérea dependerá no solo de la componente horizontal de la distancia, sino también de su componente vertical, que a su vez dependerá de la elevación de los cables y de la orografía.

Por otra parte, otros estudios sobre grandes poblaciones que categorizan la exposición basándose en cálculos de la inducción magnética, adoptan enfoques tridimensionales de la distancia, pero, debido a las dificultades metodológicas que conlleva abarcar extensiones territoriales importantes, deben adoptar algunas simplificaciones de la realidad, como una consideración parcial tanto del relieve del terreno como del pando de la línea eléctrica.

En este trabajo el objetivo consistió en analizar el posible error cometido cuando la distancia geométrica es simplificada según dos conceptualizaciones habituales en la literatura, las cuales se han representado en la Figura 5.1. La primera es la mínima distancia en proyección horizontal (Modelo A) basada en un estudio realizado en el Reino Unido (Draper et al., 2005) el cual se convirtió en un referente al indicar una asociación

entre viviendas cercanas a líneas eléctricas aéreas con casos de leucemia infantil y que ha sido replicado en otras grandes poblaciones como California, Francia o Dinamarca (Crespi et al., 2016; Pedersen, Raaschou-Nielsen, et al., 2014; Sermage-Faure et al., 2013) así como en combinación con otros posibles factores de riesgo ambiental, como el radón, la contaminación del aire causada por el tráfico o la exposición a pesticidas (Hoffmann et al., 2008; Pedersen, BräUner, et al., 2014; Reynolds et al., 2001).

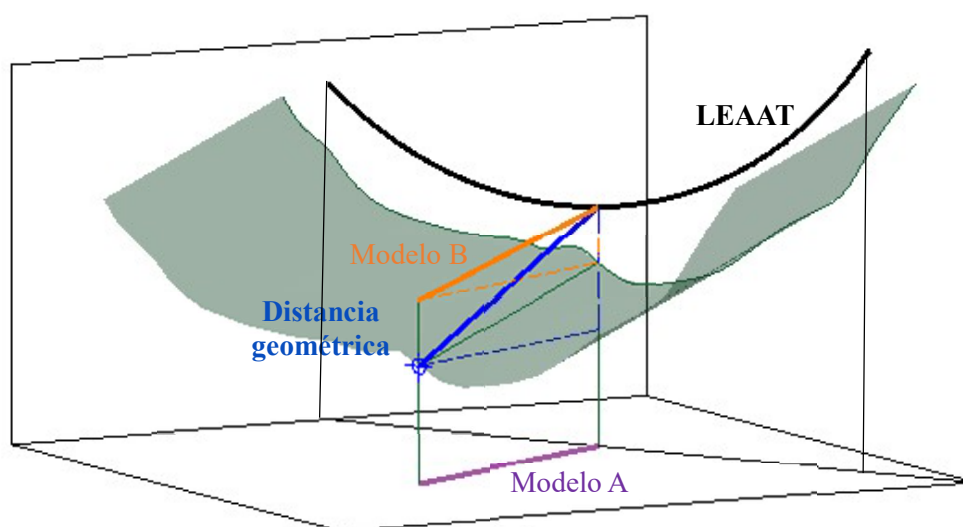


Figura 5. 1. Simplificaciones habituales de la distancia geométrica en estudios epidemiológicos de CM FEB. Fuente: Miravet-Garret et al., 2021a

La otra conceptualización de la distancia corresponde a la distancia geométrica, pero en la que la elevación relativa entre el punto del suelo donde se quiere calcular el CM y la línea eléctrica se realiza considerando que la elevación de ese punto del terreno es la existente en otro punto situado directamente bajo la línea, en un plano perpendicular a la proyección horizontal de la línea desde el punto de estimación (Modelo B). Algunos ejemplos de su aplicación se encuentran en estudios llevados a cabo en Inglaterra y Francia (Bessou et al., 2013; Swanson, 2008)

5.1.3. Zona de estudio

La zona escogida para el estudio corresponde a un barrio residencial de Málaga capital (España) de reciente expansión urbanística en la que se encuentran varios centros

escolares y otros servicios sociales. El relieve del suelo en la zona es muy variable, con altitudes ortométricas comprendidas entre 9.5 m y 240.16 m según el Instituto Geográfico Nacional (IGN) de España. La tipología urbanística según el parcelario catastral incluye desde viviendas unifamiliares aisladas hasta urbanizaciones con varios edificios de múltiples viviendas (Figura 5.2).



Figura 5. 2. Imagen de la zona de estudio. Fuente: Google, s.f.

Esta zona es atravesada por un tramo de 2.5 km de la LEAAT denominada “Montes-Centro” que une la subestación eléctrica “Montes” con la línea eléctrica subterránea “Centro”, mediante dos circuitos de 66 kV a través de ocho vanos. El trazado de la línea eléctrica también es accidentado, encontrándose algunos apoyos sobre montículos elevados en zonas de difícil acceso, a veces rodeados de densa vegetación, mientras que otros están simplemente situados a pie de calle, tal y como puede verse en las imágenes de la Figura 5.3, correspondientes a algunos detalles de la línea.

La línea es de doble circuito trifásica con una disposición en doble bandera y con conductores LA-280. Estos datos de la línea, así como la altura útil, ancho de crucetas y valores de tensión mecánica de los cables fueron proporcionados por la compañía e-Distribución Redes Digitales S.L.U. responsable de la gestión de esta línea.

La delimitación de la zona de estudio se hizo a 1000 m a cada lado de la línea ya que esta distancia garantiza que los valores de CM caen a valores de ambiente y no se encuentran influenciados directamente por la LEAAT.



Figura 5.3. Detalles de la línea eléctrica “Montes-Centro”

5.2. Metodología

La metodología desarrollada en este trabajo para llevar a cabo el análisis del error se fundamenta en la generación de una superficie de distancias geométricas a la línea eléctrica aérea. Para ello, fue necesario, en primer lugar, modelar tridimensionalmente la zona de estudio sobre la cual obtener estas distancias mínimas entre los puntos del terreno y la línea eléctrica más próxima, así como los valores de distancias correspondientes a los dos modelos a analizar. Posteriormente, a partir de estos valores y mediante las operaciones espaciales que se detallarán a lo largo de esta sección, se obtuvo una superficie de error para cada uno de estos modelos. El programa informático utilizado fue el paquete ArcGIS v10.8 de ESRI.

5.2.1. Fuentes de información: datos tridimensionales, vectoriales e imágenes aéreas

A continuación, se detallan las fuentes cartográficas utilizadas como base para el modelado tridimensional.

Ortofotografías

Mosaico de ortofotos del PNOA

Descripción: Ortofoto “PNOA_MA_OF_ETRS89_HU30_h50_1053” de la serie “máxima actualidad” en formato “ecw” con una resolución de 35 cm por píxel. Se muestra un extracto en la Figura 5.4.

Fuente: Plan Nacional de Ortografía Aérea (PNOA) con fecha de creación en el año 2016 en sistema de referencia geodésico ETRS89 y proyección UTM en el huso 30. Proporcionados mediante descarga gratuita por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) de España.



Figura 5. 4. Extracto de ortofoto aérea de la zona de estudio. Fuente: adaptado de IGN, 2023

Cartografía tridimensional

Modelo Digital del Terreno (MDT)

Descripción: Cobertura ráster de las alturas ortométricas del terreno “PNOA_MDT05_ETRS89_HU30_1053_LID” sin edificaciones ni vegetación de 5 m de

resolución en formato ASCII matriz ESRI (“asc”) con una raíz del error medio cuadrático en las elevaciones $RMSz = 0.5$ m.

Fuente: Plan Nacional de Ortografía Aérea (PNOA) con fecha de creación en el año 2015 en sistema de referencia geodésico ETRS89 y proyección UTM en el huso 30. Proporcionados mediante descarga gratuita por el Instituto Geográfico Nacional (IGN).

5.2.2. Modelado 3D de la zona de estudio

El modelado del terreno quedaría definido por el modelo digital del terreno descargado del PNOA definido en las fuentes de información. Este serviría para representar el relieve de la zona de estudio y derivar las altitudes ortométricas necesarias para el modelado de la catenaria, tal y como se describe en los apartados siguientes.

5.2.2.1 Modelo de la catenaria: digitalización de la línea eléctrica aérea en 2D

Para digitalizar la línea eléctrica primero se trazaron las ubicaciones de cada apoyo como entidades de puntos utilizando como referencia la ortofoto del PNOA de 35 cm de resolución. Se situó cada punto en el centro de la base de la torre eléctrica. Al archivo generado se le denominó “Apoyo_Montes_Centro.shp”. Estas ubicaciones fueron contrastadas mediante la comparación de esta imagen aérea con las disponibles en la aplicación Google Maps, así como mediante inspecciones visuales in situ para todas aquellas que se pudieron visitar, ya que algunas se encontraban en caminos privados con el acceso vallado. Por este motivo y porque los propios pies de las torres no estaban siempre accesibles por motivos de seguridad, se descartó posicionar las torres en la cartografía mediante un dispositivo de posicionamiento global (GPS), y dada la alta resolución de la cartografía de referencia, se consideró válido el procedimiento de digitalización descrito.

Los valores de la altura libre de los cables y otros datos geométricos de cada torre eléctrica, como la separación entre las fases y entre circuitos, también fueron corroborados “in situ” para aquellas estructuras que pudieron ser visitadas. Se utilizó un distanciómetro modelo Leica DISTO A5 con una precisión de ± 1.5 mm y se detectó que los anclajes de los cables de algunas de las torres situadas en la vía pública presentaban

una mayor altura sobre el suelo por estar estos apoyos asentados sobre bases de hormigón. Una vez verificados todos los datos, se incluyeron en la tabla alfanumérica asociada a la capa cartográfica correspondiente.

Utilizando la capa de apoyos como referencia, se digitalizó la proyección horizontal de cada vano mediante la delineación de segmentos rectos con sus extremos en los apoyos y se almacenó en un shapefile de líneas como clase de entidad, al que se denominó “Línea_Montes_Centro.shp” (Figura 5.5).

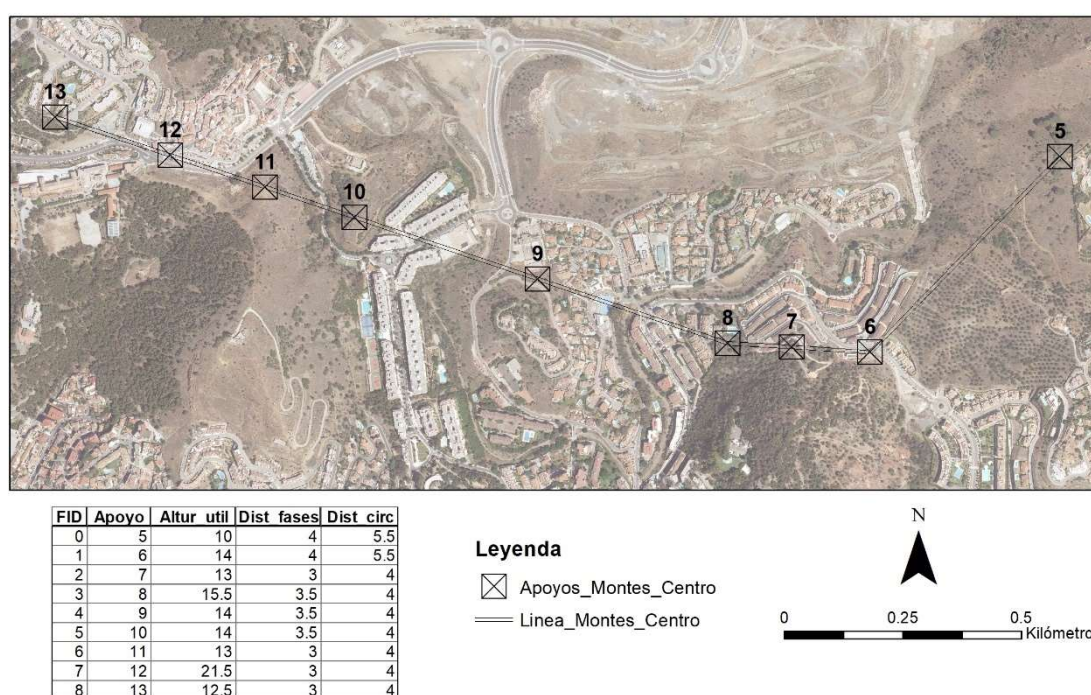


Figura 5. 5. LEAAT “Montes_centro” digitalizada y tabla de datos asociada a los apoyos

5.2.2.2. Modelo de la catenaria: digitalización de la línea eléctrica aérea en 3D

Siguiendo la propuesta de Mamishev et al., (1996) se discretizó la catenaria en puntos. Este procedimiento se realizó de forma individualizada para cada vano con el objeto de poder mantener definidos como extremos de cada uno los puntos correspondientes a los apoyos de inicio y fin.

Se obtuvieron así los archivos “Puntos_Vano_ni_nf.shp” siendo “ni” el número de apoyo inicial y “nf” el número de apoyo final. Se crearon por tanto ocho nuevos

shapefiles en los que mediante la herramienta de edición “Construir puntos” se construyeron estos elementos sobre el trazado de la línea eléctrica a intervalos de 0.5 m. Después, todos los archivos correspondientes a cada uno de los tramos se fusionaron en un único archivo (“Puntos_Montes_Centro.shp”), obteniendo así la totalidad de la línea eléctrica discretizada en puntos cada medio metro y con los apoyos de cada vano también definidos, obteniendo un total de 4749 puntos. En la siguiente imagen (Figura 5.6) se muestra una selección (color cian) de siete puntos en torno al apoyo número 7, en la que se amplió la escala en una ventana gráfica al objeto de que pueda apreciarse la discretización. En la tabla adjunta se muestran los puntos identificados.

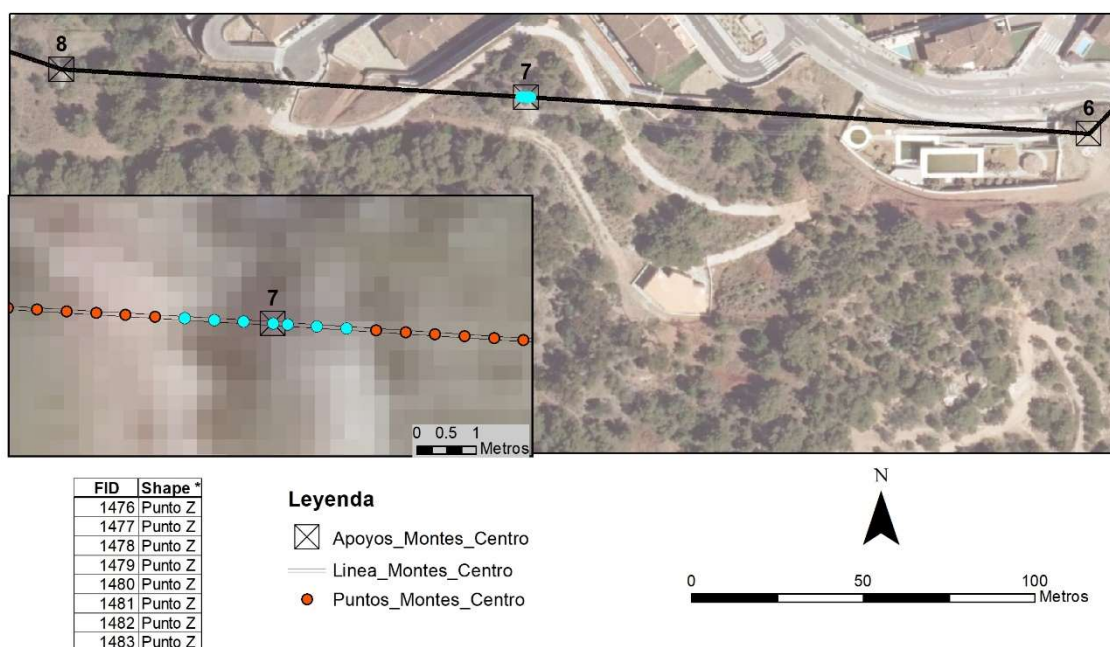


Figura 5. 6. Discretización de la catenaria en puntos cada 0.5 metros en torno al apoyo número 7

La asignación de la altitud ortométrica H (m) correspondiente a cada uno de estos puntos según su posición en la catenaria se resolvió calculando primero su ordenada y (m) según el sistema de coordenadas propio de la catenaria y después refiriendo esa ordenada a la superficie de referencia de altitudes ortométricas, tal y como se esquematiza en la Figura 5.7.

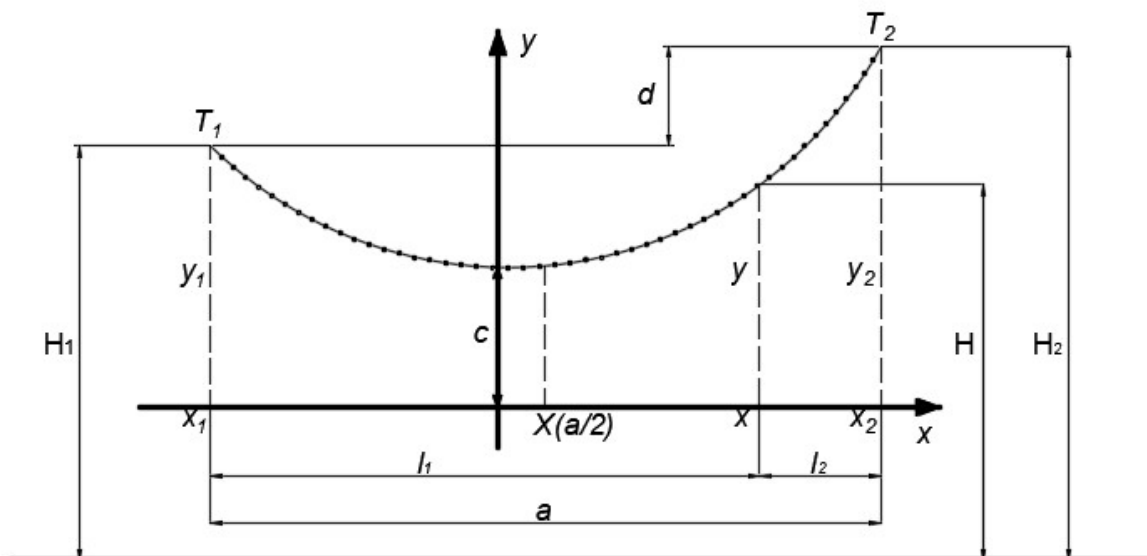


Figura 5. 7. Esquema de referenciación de las ordenadas de los puntos de la catenaria como altitudes ortométricas

De la figura anterior se deduce que esta altitud puede calcularse según la expresión (6):

$$H = y + (H_1 - y_1) \quad (6)$$

donde H_1 es la altitud ortométrica del centro geométrico de los conductores en el apoyo inicial del vano al que pertenece el punto de la catenaria que se está calculando; y_1 es la ordenada de ese mismo centro geométrico referida al sistema local de la catenaria (Figura 5.8). Aunque la línea eléctrica aérea está formada por varios cables, para este estudio se conceptualizan como un único cable ubicado en el centro geométrico de la disposición que conforman, ya que de esta forma el error del campo magnético es mínimo (Cruz-Romero, 2000). Este centro geométrico quedaría representado, por tanto, mediante el punto que identifica el apoyo.

A continuación, se detallan los procedimientos seguidos para obtener cada variable y asociarlas a los puntos que conforman la catenaria en nuevos campos de su tabla alfanumérica y, a partir de estos campos, poder calcular la altura ortométricas de cada punto.

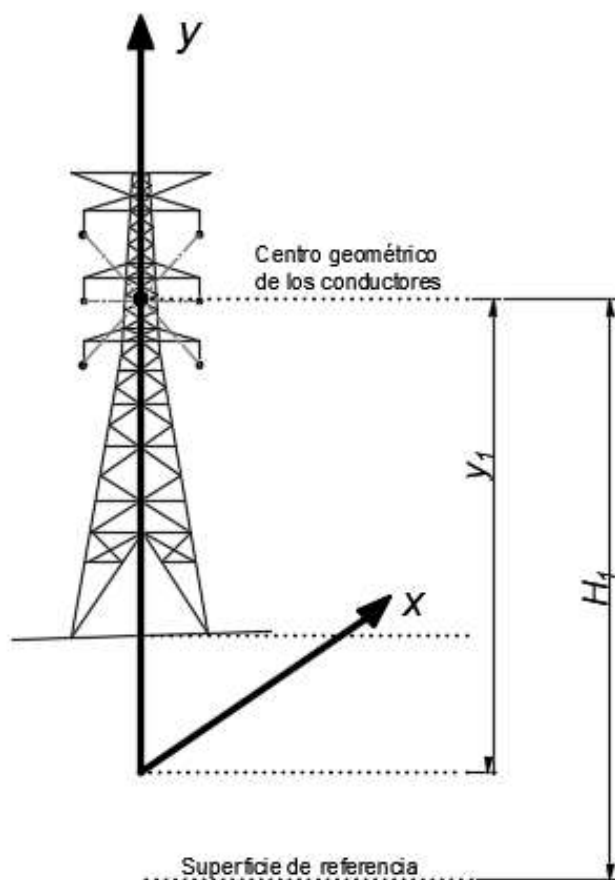


Figura 5. 8. Esquema de determinación de la altitud ortométrica del centro geométrico de los conductores

I. Determinación de la altura ortométrica H_1 del centro geométrico de los conductores

Para asociar a cada punto de la catenaria la altura ortométrica del centro geométrico de los conductores del apoyo inicial (H_1) del vano al que pertenecían se realizó el siguiente procedimiento:

- 1) En la capa “Apoyo_Montes_Centro.shp” correspondiente a los puntos que identifican solamente los apoyos, se asoció a cada uno la altura ortométrica de su pie derivándola del MDT mediante la herramienta “Extraer valores a puntos”. De esta manera se obtuvo un nuevo archivo denominado “Apoyo_Montes_Centro_MDT.shp” donde un campo al que se denominó Z registraría estos valores de altitudes.

2) A la tabla alfanumérica de esta capa se le añadió un nuevo campo en el que se calculó mediante la “Calculadora de campo” la altura ortométrica del centro geométrico de los conductores (con nombre del campo *Z_fase2*) que vendría dada por la suma de la altura ortométrica del pie (*Z*), la altura útil (*Altur_util*) y el espaciado entre fases (*Dist_fases*) correspondiente a cada apoyo, según el siguiente código:

$$Z_{fase2} = [Altur_util] + [Dist_fases] + [Z]$$

El procedimiento y el resultado sobre el campo correspondiente se puede observar en la imagen inferior (Figura 5.9), donde sobre la ortofoto de la zona de estudio se encuentra la línea eléctrica representada ahora mediante una doble línea. Los apoyos se muestran numerados y simbolizados mediante un cuadrado con diagonales, y sus datos aparecen recogidos en la tabla alfanumérica asociada a su capa cartográfica:

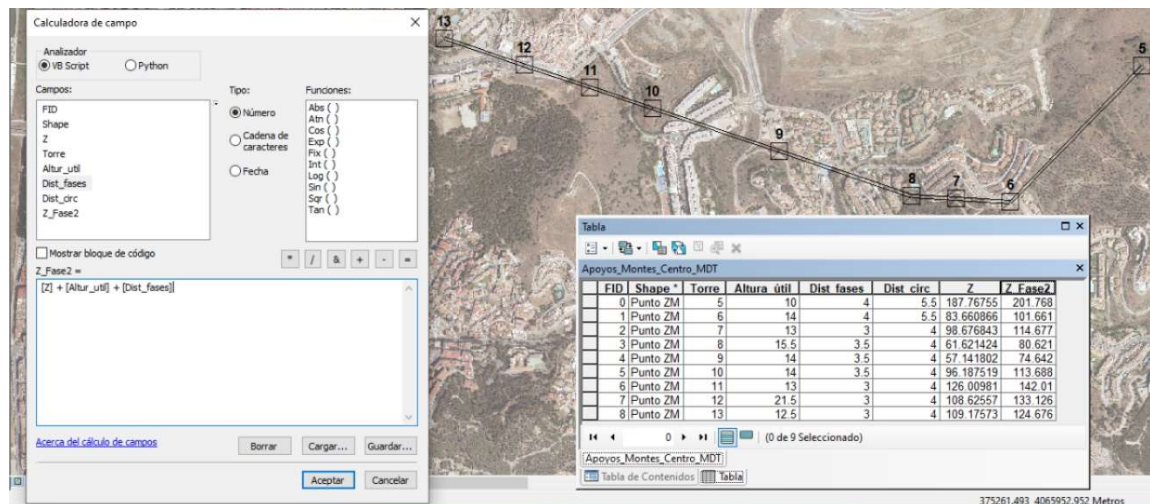


Figura 5. 9. Cálculo mediante el programa informático ArcMap de la altura ortométrica del centro geométrico de los conductores en cada apoyo

II. Determinación de la ordenada y de cualquier punto en el sistema local de la catenaria

Para resolver la expresión matemática (7) de la ordenada de cualquier punto de la catenaria,

$$y = c \cosh \frac{x}{c} \tag{7}$$

la constante de la curva c (m) se obtendría a partir de los valores de la componente horizontal mecánica de la tensión T que fue facilitada por la compañía eléctrica, y por el peso de cable por unidad lineal que para un conductor LA-280 es de 976.2 Kg/km (Norma GE CNL001: Conductores Desnudos Para Líneas Eléctricas Aéreas de Alta Tensión, de Tensión Nominal Superior a 30 KV, 2012).

El cálculo de la abscisa de cualquier punto x (m) vendría dada por las ecuaciones 8 y 9 que también se deducen de la Figura 5.7:

$$x = l_1 - |x_1| \quad (8)$$

$$x_1 = X - a/2 \quad (9)$$

Donde l_1 es la distancia del punto que se quiere calcular a dicho apoyo, x_1 es la abscisa del apoyo inicial del vano, X (m) es la abscisa del punto medio del vano dada por la expresión (10), a es la luz del vano, d (m) representa el desnivel de cada vano:

$$X = cA \sinh z = c \ln(z + \sqrt{z^2 + 1}) \text{ donde } \sinh \frac{x}{c} = \frac{d}{2c \sinh \frac{a}{2c}} = z \quad (10)$$

Los parámetros desnivel del vano y distancia de cada punto al apoyo inicial del vano se obtuvieron mediante el siguiente procedimiento:

- 1) A partir de las altitudes ortométricas de los centros geométricos de los cables en cada apoyo se dedujeron los desniveles de cada vano. Estos, así como la altitud del centro geométrico en el primer apoyo de cada vano (Z_{Fase2}), fueron registrados en la tabla correspondiente al trazado de la línea (Línea_Montes_Centro.shp).
- 2) Mediante la “Calculadora de geometría” se asoció a cada vano su luz en metros también en la capa de entidades de línea.
- 3) También en esa capa, para obtener la distancia de cada punto de la catenaria al apoyo inicial, se definieron las coordenadas geográficas planas (x_{geom} , y_{geom}) de su punto inicial de cada vano (posición del apoyo inicial) tal y como

se recoge en la captura de pantalla de la interfaz de ArcMap (Figura 5.10). Estas coordenadas permitirían, una vez definidas las coordenadas geográficas planas de cada punto de la catenaria, calcular matemáticamente la distancia de cada punto a su apoyo inicial. Se descartó para este fin un análisis de proximidad ya que conllevaría un procedimiento muy repetitivo debido a la necesidad de ir aplicando esta operación de forma diferenciada para los puntos de cada vano.

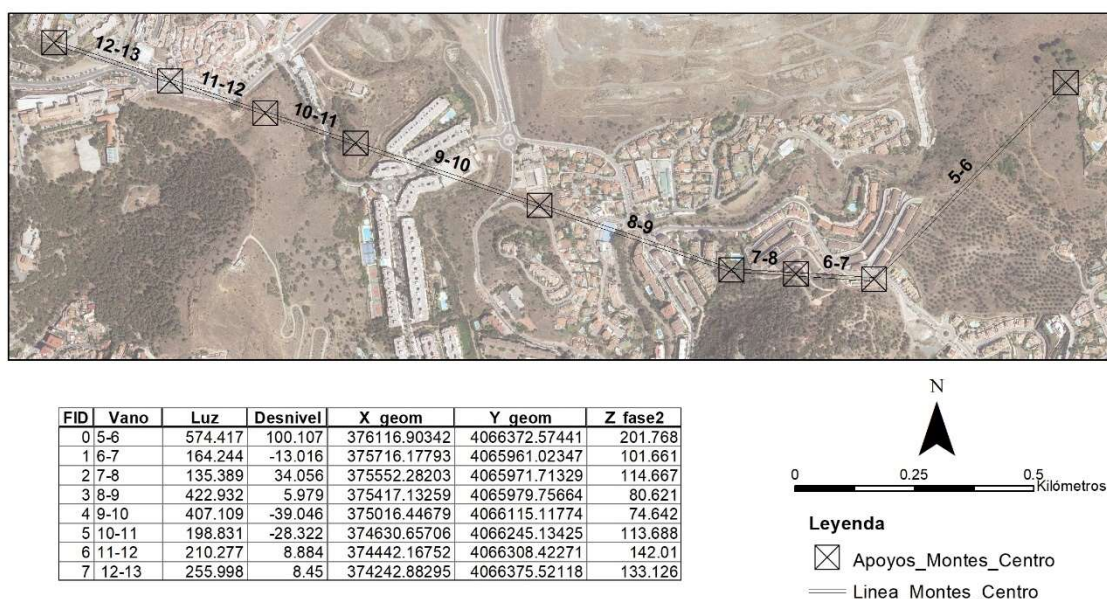


Figura 5.10. Trazado de la línea eléctrica y datos asociados

- 4) Para asociar a cada punto de la catenaria los datos correspondientes al vano al que pertenecía (vano, luz, coordenadas geográficas del primer apoyo, desnivel del vano y altura ortométrica del centro geométrico del primer apoyo), se llevó a cabo una operación de “Unión espacial” en la que la entidad de destino era la capa “Puntos_Montes_Centro.shp” y la entidad de entrada era la capa “Lineas_Montes_Centro.shp”. A la nueva capa generada mediante esta unión se la denominó “PuntosMC_UE2_Lineamc.shp”.
- 5) A la tabla correspondiente a la capa generada en el paso anterior, se le agregó mediante la “Calculadora de geometría” las coordenadas geográficas de cada punto de la catenaria, creando en dicha tabla los campos X_geo_poin,

Y_geo_poin. En la imagen inferior (Figura 5.11) se muestra una consulta de siete puntos pertenecientes al vano 7-8 y sus datos asociados en forma tabular.

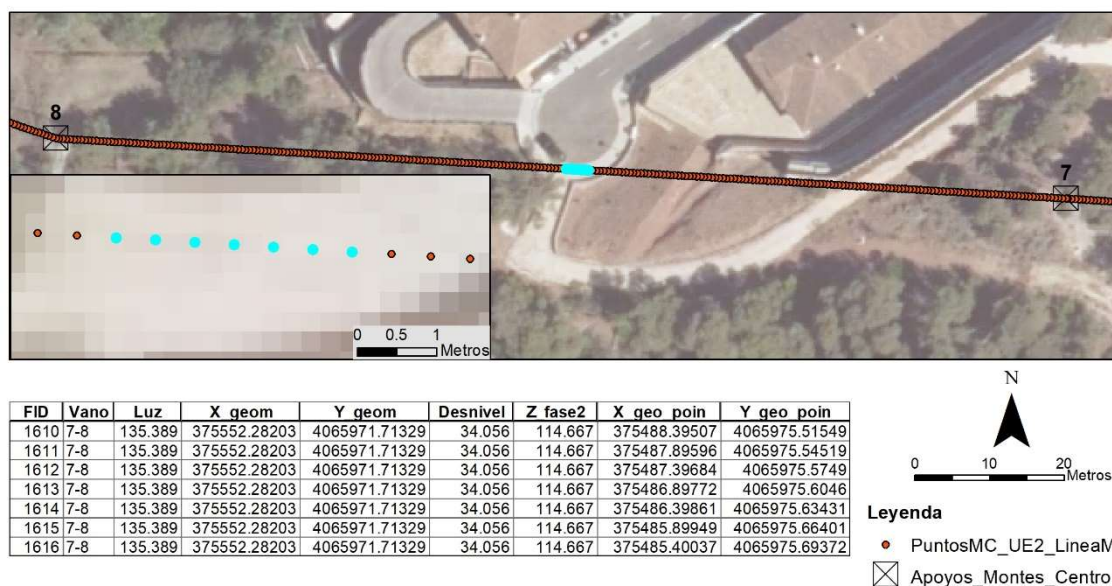


Figura 5. 11. Mapa de discretización del vano 7-8 de la catenaria y ejemplo consulta de atributos de los puntos seleccionados

Definidas ya para cada punto estas variables, el cálculo mediante la calculadora del programa ArcMap de la abscisa del punto medio del vano, así como de las ordenadas de los puntos requería que las operaciones fueran desarrolladas en el lenguaje informático Python. Dado que el objetivo de este trabajo era proporcionar un procedimiento sencillo para el cálculo de superficies campo magnético y dada la facilidad de interacción del programa ArcGIS con cualquier hoja de cálculo, se consideró más adecuado finalizar los cálculos mediante el programa “Microsoft Excel”. Por tanto, la tabla asociada a la capa “PuntosMC_UE_LineaMC.shp” que se encontraba en formato “dBase” se exportó desde ArcMap para poder procesarla en el programa informático “Excel”.

Una vez importada como una hoja de cálculo y renombrada como “Catenaria_Montes_Centro.xls” se le añadió todos los campos correspondientes a las demás variables necesarias para resolver la ecuación de equilibrio de la catenaria. En la Tabla 5.1 se recoge la totalidad de los campos que conformaron esta hoja de cálculo.

Nombre del campo	Significado
FID	Identificador de punto
Vano	Identificador de vano
Luz	Distancia horizontal entre apoyos (m)
X_geom	Coordenada geográfica <i>x</i> del apoyo inicial
Y_geom	Coordenada geográfica <i>y</i> del apoyo inicial
Desnivel	Diferencia de alturas ortométricas entre los centros geométricos de la disposición de fases en el vano al que pertenece ese punto (m)
Z_Fase2	Altura ortométrica del centro geométrico de las fases en el apoyo inicial de cada vano
X_geo_poin	Coordenada geográfica plana <i>x</i> del punto correspondiente de la catenaria (m)
Y_geo_poin	Coordenada geográfica plana <i>y</i> del punto correspondiente de la catenaria (m)
Distancia	Distancia horizontal del punto al apoyo inicial de su vano en el sistema de referencia local de la catenaria (m)
cte_curva	Constante de la catenaria (m)
z_cat	Parámetro de la catenaria que depende de la constante, del desnivel del vano y de la longitud del vano (ver Ecuación 2)
X_cat	Abscisa del apoyo inicial del vano al que pertenece el punto en el sistema de referencia de la catenaria (m)
X_cat1	Abscisa del apoyo inicial del vano al que pertenece el punto en el sistema de referencia de la catenaria (m)
Y_cat1	Ordenada del apoyo inicial del vano al que pertenece el punto en el sistema de referencia de la catenaria (m)
X_cat_n	Abscisa del punto en el sistema de referencia de la catenaria (m)
Y_cat_n	Ordenada del punto en el sistema de referencia de la catenaria (m)
POINT_ELEV	Altitud ortométrica del punto según su posición en la catenaria (m)

Tabla 5. 1. Lista de variables incluidas en la hoja de cálculo para la determinación de la elevación ortométrica de la catenaria

Los valores y las fórmulas introducidas en esta hoja de cálculo fueron:

- **Distancia.** Corresponde a la distancia horizontal en metros de cada punto a su apoyo inicial del vano, dada por la Ecuación 11:

$$Distancia = \sqrt{(X_{geom} - X_{geo_poin})^2 + (Y_{geom} - Y_{geo_poin})^2} \quad (11)$$

Puede observarse en la Figura 5.11 como esta distancia se incrementa medio metro entre puntos consecutivos, tal y como corresponde al valor de discretización de la catenaria a excepción del punto previo al apoyo final de cada vano, que quedará de este a la distancia restante.

- **Cte_curva.** Representa la constante de la catenaria en metros. En este trabajo fue facilitada por la empresa gestora de la línea eléctrica a partir del valor de tensión mecánica y del peso lineal del cable.
- **z_cat.** Es una constante adimensional de cada vano. El cálculo de este parámetro se implementó según (12):

$$z_{cat} = \frac{Desnivel}{2 * cte_curva \sinh \frac{Luz}{2 cte_curva}} \quad (12)$$

- **X_cat.** La abscisa del punto medio del vano se calculó asociando convenientemente en su expresión las diferentes celdas implicadas, obteniendo la expresión (13):

$$X_{cat} = cte_curva A \sinh z_{cat} \quad (13)$$

- **X_cat1.** La abscisa del punto inicial de cada vano se obtuvo según (14):

$$X_{cat1} = X_{cat} - Luz/2 \quad (14)$$

- **Y_cat1.** La ordenada del punto inicial de cada vano se obtuvo implementando la ecuación de equilibrio de la catenaria (15):

$$Y_{cat1} = cte_curva \cosh \frac{X_{cat1}}{cte_curva} \quad (15)$$

Estos últimos cinco parámetros tendrán valores idénticos para los puntos de cada vano.

- **X_cat_n.** Con los valores obtenidos previamente ya era posible obtener la abscisa de cualquier punto n de la catenaria, restando a la distancia a la torre inicial del punto que se está calculando, la abscisa correspondiente a esa torre. Para ello se implementó la expresión (16):

$$X_{cat_n} = Distancia - |X_{cat1}| \quad (16)$$

- **Y_cat_n.** Resuelta la variable anterior y llevando su valor para cada punto a la ecuación de equilibrio de la catenaria, de la misma manera que se procedió para solucionar la ordenada del cg de las fases de cada torre, se obtuvo la ordenada de cada punto en el sistema local de la catenaria. La expresión matemática según las variables definidas en la Tabla 5.1 sería (17):

$$Y_{cat_n} = cte_curva \cosh \frac{X_{cat_n}}{cte_curva} \quad (17)$$

- **POINT_ELEV.** Corresponde a la altura ortométrica de cada punto de la catenaria ya que el valor Y_{cat_n} proporciona la elevación del punto, pero respecto al eje de abscisas particular de cada catenaria. Por tanto, para poder hallar valores de distancias entre el suelo y los cables, las alturas de ambos deben de estar referidos a un mismo sistema de coordenadas geográficas. Estos valores se dedujeron con la siguiente expresión (18):

$$POINT_ELEV = Y_{cat_n} + (Z_Fase2 - Y_{cat1}) \quad (18)$$

III. Definición de la altura ortométrica de cada punto

Una vez resuelta la hoja de cálculo “Catenaria_Montes_Centro.xls”, nuevamente en el programa ArcMap se convirtió a tabla mediante la herramienta de conversión “Excel a tabla”, obteniendo el archivo “Catenaria_Montes_Centro.dbf”. Para vincular esta tabla a la capa de puntos cartográfica de la catenaria y así tener definido para cada uno de ellos su altura ortométrica, se realizaron las siguientes operaciones:

- 1) Se estableció una “Unión” entre “Catenaria_Montes_Centro.dbf” y “Puntos_Montes_Centro.shp” utilizando el campo FID correlativo entre ambos archivos como clave para la indexación y exportando el resultado como un nuevo shape se obtuvo la capa “Catenaria_MC_MDT05”

- 2) Una vez vinculada para cada punto su altura ortométrica, sería necesario a efectos de realizar cualquier análisis espacial definir este valor de campo como su coordenada geográfica de elevación. Para ello se utilizó la herramienta de análisis espacial 3D “De Entidad a 3D por atributo”, donde la entidad de entrada sería la capa “Catenaria_MC_MDT05” y el atributo para convertir los puntos en entidades tridimensionales sería “POINT_ELEV”. A la capa de salida de le denominó “Catenaria_MC_MDT05_3D”. Un ejemplo de su representación tridimensional mediante ArcScene se puede observar en la siguiente imagen (Figura 5.12):



Figura 5. 12. Modelado 3D de zona de estudio representada mediante ArcScene

Este modelado se consideró estable en el tiempo e independiente de aquellos factores que pueden afectar al hundimiento de la línea: la temperatura de los cables debida al calentamiento propio causado por las condiciones de trabajo y las condiciones meteorológicas. En el primer caso, cabe señalar que la separación del suelo de los cables disminuye al incrementarse la corriente circulante por ellos. Sin embargo, los valores de intensidad de corriente circulante suelen ser siempre menores que los soportables por las líneas eléctricas. En el segundo caso, la presencia de viento no suele ser habitual en esa región y excepcional la de nieve o hielo, por lo que posible despreciar sus efectos. Por otra parte, si se tiene en cuenta que una variación de $\pm 25^{\circ}\text{C}$ puede provocar una modificación de $\pm 1\text{m}$ en la flecha máxima del cableado aéreo, pero que la zona se

caracteriza por un clima suave durante todo el año donde los periodos de temperaturas extremas son escasos y cortos, este efecto también fue posible obviarlo.

Para facilitar la comprensión del flujo de trabajo de geoprocesamiento realizado para obtener el modelado de la catenaria, en la Figura 5.13 se recoge el diagrama de todo el procedimiento.

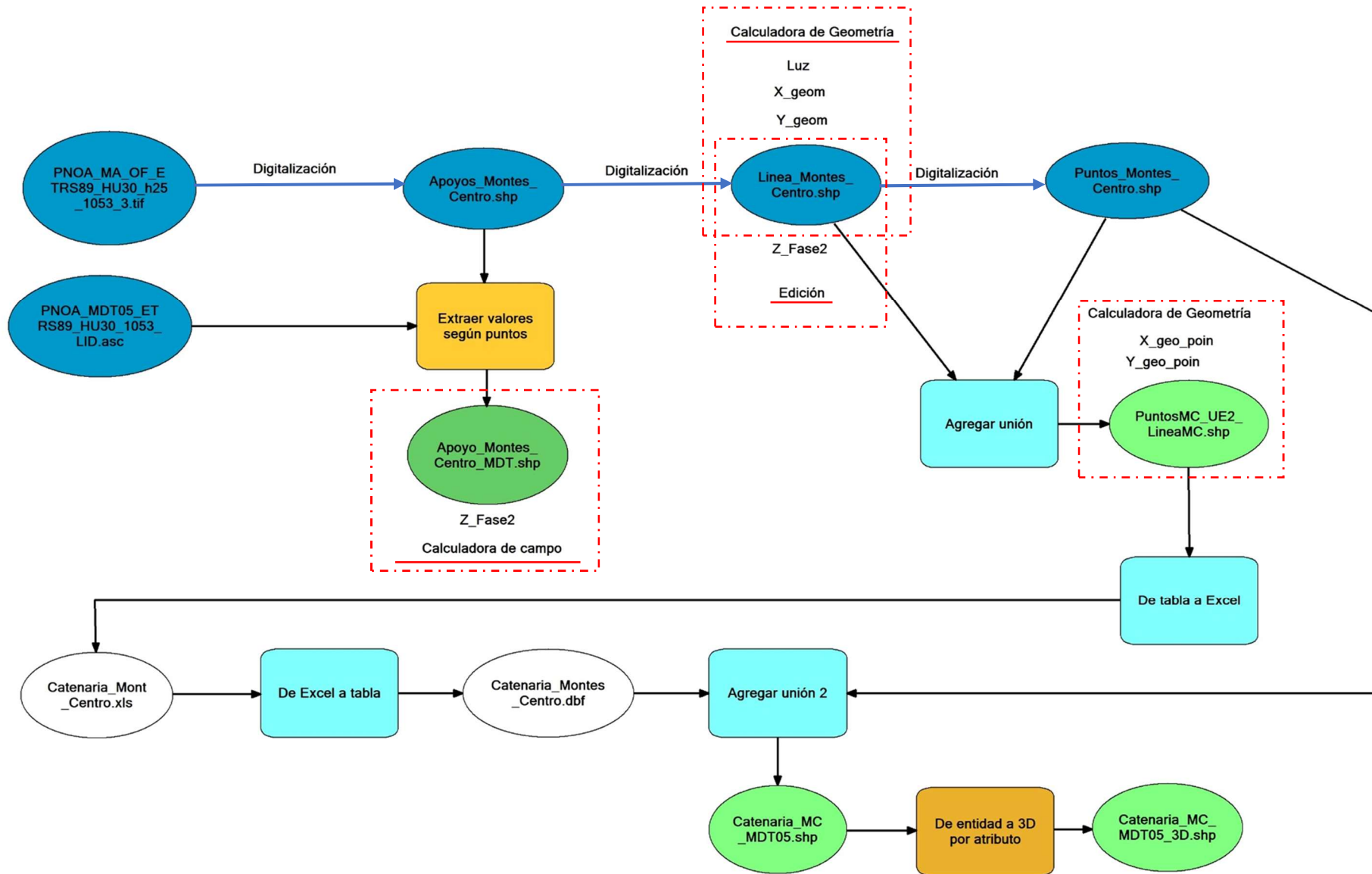


Figura 5. 13. Flujo de trabajo para modelado 3D de la catenaria

5.2.3. Validación del modelado

El modelado tridimensional de la zona de estudio fue validado al objeto de conocer la precisión de las mínimas distancias geométricas entre cualquier punto del terreno y la catenaria que fueran derivadas de este. Para ello, se escogieron 10 ubicaciones en la zona de estudio desde donde era posible medir la distancia a los cables y considerando además que estas ubicaciones estuvieran suficientemente separadas entre sí al objeto de evitar errores sistemáticos locales. No fue posible encontrar un número mayor de localizaciones que permitieran establecer visuales claras sobre los cables debido a la urbanística y a la orografía de la zona. Estas ubicaciones fueron geolocalizadas mediante un receptor GPS (modelo Leica Viva GNSS GS15) y se volcaron en un shapefile de puntos denominado “UBICACIONES_DE_CONTROL”.

Para las localizaciones de control establecidas se obtuvieron las mínimas distancias geométricas a la catenaria (NEAR_DIST_3D) mediante la herramienta de análisis de proximidad “Cercano 3D” y se registraron para cada punto en un campo de la tabla denominado NEAR_DIST_3D. Esta herramienta también proporcionó el punto de correspondencia de la catenaria a cada localización donde se cumplía esta mínima distancia mediante el identificador del punto definido en el campo FID_PUNTO. Las distancias reales de estos puntos a la línea eléctrica fueron medidas con una estación total (modelo Leica TS02) (Figura 5.14). Para poder identificar durante los trabajos de campo la posición de estos puntos sobre los cables, se registró para cada ubicación una dirección de referencia sobre la cartografía, que sería la del aparato una vez estacionado en esa ubicación. Estas referencias normalmente correspondieron a esquinas de cubiertas de edificaciones o de chimeneas cercanas fácilmente identificables. Las visuales se realizaron siempre sobre ambos cables de segunda fase para posteriormente poder calcular la mínima distancia al centro geométrico de los conductores en función de la separación de estos, ya que este centro geométrico es



Figura 5.14. Trabajos de campo con estación total

el que se había utilizado para el modelado de la línea eléctrica como un único cable y sobre el que se obtendrían las distancias modeladas.

Cuando las distancias no eran muy grandes y trabajando en horas del día donde la radiación solar sobre los cables fuera mínima, pero hubiera suficiente luz para poder visualizarlos, los valores de distancias se midieron directamente mediante el distanciómetro láser de la estación total (modo sin prisma).

Esto no fue posible en 4 localizaciones, en las que hubo que aplicar el método de doble observación estacionando en dos lugares consecutivos (E_1 , E_2 de la Figura 5.15) situados en la misma dirección de la visual al punto del cable desde la primera estación. En la misma figura se ha esquematizado la lectura al cable situado a la altura del centro geométrico más cercano a la estación (Cable F2a).

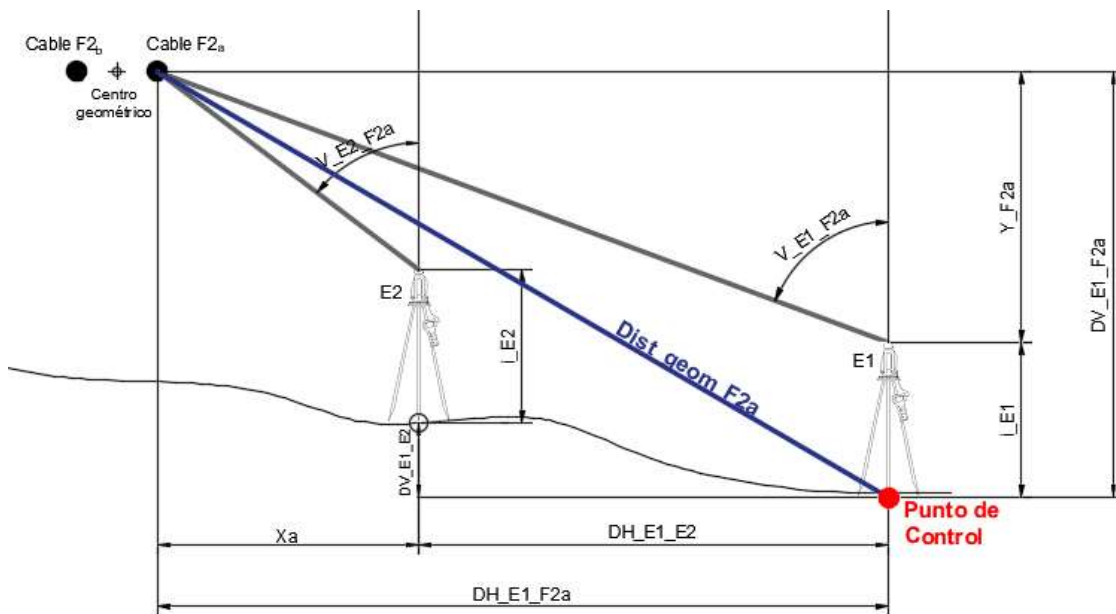


Figura 5. 15. Esquema para el cálculo de la distancia al centro geométrico de los conductores mediante una doble observación

Los valores esquematizados se obtendrían también para el cable simétrico (Cable F2b), y la distancia geométrica desde el punto de control al centro geométrico entre ambos cables ($Dist_{geom_cg}$) se obtendría según la siguiente expresión (19):

$$Dist_{geom_cg} = \sqrt{\left(\frac{DH_{E1_F1a} + DH_{E1_F2b}}{2}\right)^2 + \left(\frac{DV_{E1_F1a} + DV_{E1_F2b}}{2}\right)^2} \quad (19)$$

Aunque teóricamente el desnivel entre el punto de control y ambos cables debería ser el mismo, en la práctica no es exactamente así, por lo que se consideró necesario realizar los cálculos tal y como se ha descrito.

Para resolver la ecuación anterior (19), la distancia horizontal entre el punto de control y el primer cable (DH_{E1_F2a}) se calculó según (20):

$$DH_{E1_F2a} = Xa + DH_{E1_E2} \tag{20}$$

Donde la distancia horizontal Xa entre la estación E2 y el primer cable puede obtenerse despejándola de la siguiente igualdad (21) donde cada miembro representa el desnivel entre el punto y la primera estación:

$$\frac{Xa}{tg V_{E2_F2a}} + i_{E2} + DV_{E1_E2} = \frac{Xa + DH_{E1_E2}}{tg V_{E1_F2a}} + i_{E1} \tag{21}$$

Siendo el desnivel entre las dos estaciones (22):

$$DV_{E1_E2} = \frac{DH_{E1_E2}}{tg V_{E1_E2}} + i_{E1} - m_{E2} \tag{22}$$

Donde $tg V_{E1_E2}$ es valor del ángulo vertical observado desde la estación E1 a un prisma ubicado en la estación E2, i_{E1} corresponde a la altura del instrumento en E1, m_{E2} es la altura del prisma en E2.

Todos los parámetros medidos y calculados para todos los puntos de control se recogen en la siguiente captura de pantalla de la interfaz de la hoja de cálculo (Figura 5.16), donde aparecen los datos relativos a la doble observación para los puntos 0, 1, 2 y 3 mientras que en los restantes se pudo obtener las distancias directamente.

FID	i_E1 (m)	V_E1_F2a (m)	V_E1_F2b (m)	DH_E1_E2 (m)	V_E1_E2 (m)	m_E2 (m)	i_E2 (m)	DV_E1_E2 (m)	V_E2_F2a (m)	V_E2_F2b (m)	Dist_geom_F2a (m)	Dist_geom_F2b (m)	Dist_geom_eje (m)
0	1.46	87.422	87.559	40.387	99.207	1.50	1.44	0.443	85.309	85.504	266.189	269.966	268.078
1	1.48	92.152	92.201	9.723	105.777	1.50	1.45	-0.935	90.605	90.8047	98.327	107.548	102.937
2	1.4	95.798	96.103	19.986	104.870	1.70	1.37	-1.862	94.305	94.6966	156.558	160.752	158.655
3	1.43	92.019	92.238	34.837	99.623	1.40	1.43	0.236	90.475	90.7741	204.684	208.863	206.773
4											56.6895	62.046	59.368
5											84.489	89.787	87.138
6											48.883	52.660	50.772
7											68.934	73.107	71.021
8											21.317	26.817	24.067
9											134.391	137.353	135.872

Figura 5. 16. Hoja de cálculo de las distancias para los puntos de control

Introducidos estos valores de distancia en la tabla alfanumérica correspondiente a los puntos de control, se pudo comparar los valores observados con los modelados. La representación gráfica de los puntos de control y sus valores de distancia asociados aparecen en la Figura 5.17.

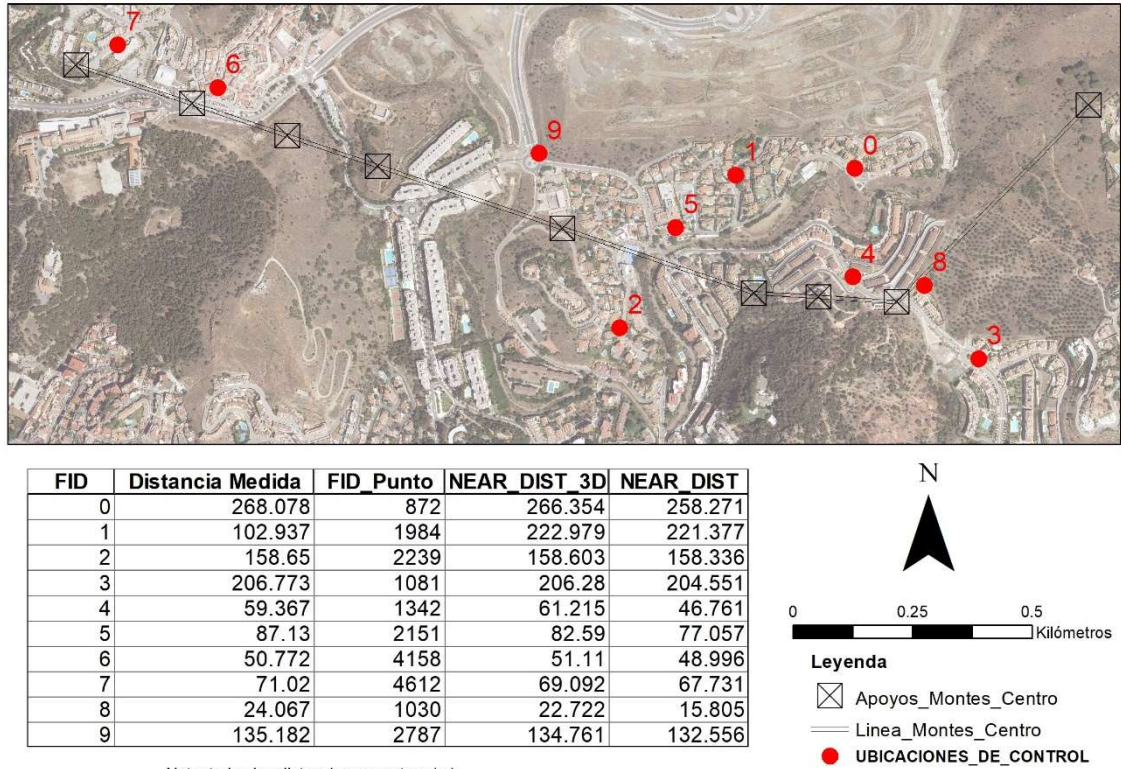


Figura 5.17. Mapa de puntos de control y datos asociados

Para realizar el análisis estadístico se eliminó el punto de control 1 por presentar un error excesivamente elevado y considerarse un valor “outlier”. Se puede observar en la tabla de la Figura 5.17 como valores asociados a este punto una distancia medida en los trabajos de campo de 102.937 m frente a una distancia modelada de 222.979 m. La causa de este error tan elevado pudo deberse a algún parámetro mal registrado durante los trabajos de campo. Se calcularon para todos los demás puntos los errores absolutos (Tabla 5.2) al objeto que los errores de distancia tanto por defecto como por exceso no se anularan entre sí.

FID	Distancia Medida (m)	Distancia Modelada (Near_Dist_3D) (m)	error (m)	error absoluto (m)
0	268.078	266.355	1.723	1.7235
2	158.650	158.603	0.047	0.0471
3	206.773	206.280	0.493	0.4925
4	59.367	61.215	-1.848	1.8479
5	87.138	82.590	4.548	4.5476
6	50.772	51.110	-0.338	0.3376
7	71.020	69.092	1.928	1.9280
8	24.067	22.722	1.345	1.3451
9	135.872	134.761	1.111	1.1110

Tabla 5. 2. Errores del modelado

El análisis estadístico de los resultados (Tabla 5.3) mostró un error medio absoluto de 1.672 m \pm 1.337 m con un nivel de confianza del 95%. Si además era eliminado el punto de control 5 que, aunque no llevaba asociada una diferencia tan grande como el punto 1, esta seguía siendo del orden de 3 veces mayor que el resto, entonces el error medio absoluto que se obtendría sería de 1.104 m \pm 0.732 m. En cualquiera de los casos, se pudo considerar que el modelado era una referencia precisa de valores de distancia.

Puntos de control excluidos	Error medio absoluto (m)	Desviación Estándar	Nivel de significación	Intervalo 95%	Intervalo 95%
1	1.673	1.337	1.027	2.700	0.645
1 y 5	1.104	0.732	0.563	1.667	0.541

Tabla 5. 3. Análisis estadístico de los errores del modelado

5.2.4. Generación de las superficies de error

La generación de una superficie de error de distancia debía realizarse a partir un número suficiente de puntos que tuvieran asociados estos valores de error. La interpolación de dichos puntos proporcionaría la superficie buscada. Los pasos seguidos para obtenerla fueron:

- 1) Definición de la zona de estudio mediante una “Zona de Influencia” de 1000 m a cada lado de la línea obteniendo la capa “Zona.shp”.

- 2) Se creó una malla de puntos de 1 x 1 m denominada “malla_zona.shp” mediante la herramienta “Crear Red”, en la que la plantilla de extensión sería “Zona.shp”. Se generaron 4 729 276 puntos.
- 3) Con la herramienta “Extraer valores a puntos” se asignó a cada punto de la malla su altitud ortométrica a partir del modelo digital del terreno, obteniendo la capa “malla_zona_Z.shp”.
- 4) Con la operación “De entidad a 3D por atributo” se convirtieron los puntos de la malla en entidades tridimensionales cuya coordenada geográfica Z de elevación correspondía a la altitud ortométrica asignada como un atributo en el paso anterior. A la capa resultante se le denominó “malla_zona3D.shp”
- 5) Utilizando el análisis de proximidad tridimensional “Cercano a 3D” se asignó a cada punto de la malla el valor de su distancia geométrica a la catenaria tridimensional en un nuevo campo al que se denominó “DIST_GEOM_3D”. Estas distancias se asumirían como valores verdaderos por haberse obtenido a partir de un modelo validado.
- 6) Se utilizó también el análisis de proximidad bidimensional “Cerca” entre las mismas capas del apartado anterior para obtener también la mínima distancia horizontal de cada punto respecto al trazado de la catenaria plano. Este valor se almacenó en un nuevo campo denominado “DIS_MOD_A” y el identificador del punto de la catenaria encontrado como el más cercano, en el campo NEAR_FID. Esta herramienta considera todo el terreno completamente plano y horizontal y que la catenaria no tiene elevación ninguna, por tanto, estas distancias obtenidas corresponderían al Modelo A.
- 7) Para calcular las distancias definidas en el Modelo B (distancia geométrica considerando la elevación real de la catenaria pero que la altitud ortométrica del punto de cálculo es la correspondiente a su punto homólogo bajo la catenaria) se estableció el siguiente procedimiento:

- Determinación de la altitud ortométrica de los puntos del terreno situados justo debajo de la catenaria. Para ello se utilizó la capa de la catenaria discretizada en puntos, y nuevamente con “Extraer valores a puntos” se le asignó a cada uno el valor de la altitud del suelo justamente debajo de ellos. A esta capa de puntos de la catenaria se le denominó “Catenaria_MC_MDT5_3DZ.shp” y al nuevo campo de la tabla de atributos donde se almacenó este valor se le denominó “Z1”, tal y como puede verse en la captura de pantalla (Figura 5.18) en ArcMap de la tabla.

FID	Vano	Long horiz	X geo poin	Y geo poin	Z1	POINT_ELEV
3412	9-10	407.109	374631.23449	4066244.93965	96.179694	113.509118
3413	9-10	407.109	374630.76067	4066245.09934	96.186177	113.655956
3414	9-10	407.109	374630.65706	4066245.13425	96.187519	113.688098
3415	9-10	407.109	374630.65706	4066245.13425	96.187519	113.688098
3416	10-11	198.831	374630.18307	4066245.29341	96.191448	113.688143
3417	10-11	198.831	374629.70907	4066245.45256	96.124347	113.688641
3418	10-11	198.831	374629.23508	4066245.61171	96.011708	113.689495
3419	10-11	198.831	374628.76108	4066245.77086	95.895973	113.690704
3420	10-11	198.831	374628.28709	4066245.93001	95.777142	113.69227

Figura 5. 18. Extracto de la tabla alfanumérica de la capa de puntos de la catenaria con valores de elevación del suelo

- Dado que esta altura es la que asume este modelo para los puntos del suelo, correspondiendo a cada uno la de su punto homólogo bajo la catenaria, se aprovechó el identificador NEAR_FID del punto de la catenaria que la operación espacial “Cerca” habría establecido como el más próximo a cada punto de la malla y así poder realizar esta asociación del valor de la altura. Así, estableciendo una “Unión” entre la capa de la malla y la de la catenaria discretizada en puntos, cada punto del suelo tuvo asignado como atributo la altitud ortométrica (Z1) de su punto homólogo bajo la línea, así como la correspondiente ese mismo punto, pero sobre la catenaria (POINT_ELEV). Al archivo resultante de esta operación se le denominó “malla_zona3D_clear_dist.shp”. En la imagen inferior (Figura 5.19), se puede observar cómo los atributos del

punto de la catenaria con identificador (FID) 1150, quedan asociados a los puntos de la malla que lo tienen definido como más próximo según el campo NEAR_FID.

FID	Vano	Long horiz	X geo poin	Y geo poin	Z1	POINT ELEV
1147	5-6	574.417	375716.81777	4065961.6806	83.42	101.616453
1148	5-6	574.417	375716.46896	4065961.32236	83.54	101.640662
1149	5-6	574.417	375716.17793	4065961.02347	83.66	101.661009
1150	5-6	574.417	375716.17793	4065961.02347	83.66	101.661009
1151	6-7	164.244	375715.67899	4065961.05601	83.58	101.66087
1152	6-7	164.244	375715.18005	4065961.08855	83.51	101.66098
1153	6-7	164.244	375714.68111	4065961.1211	83.34	101.661329

FID	Vano	NEAR_FID	Z	Z 1	POINT ELEV	DIS MOD A
0	5-6	1150	6.105921	83.66	101.661009	1098.077359
1	5-6	1150	6.113579	83.66	101.661009	1098.430772
2	5-6	1150	6.106181	83.66	101.661009	1098.78498
3	5-6	1150	6.095353	83.66	101.661009	1099.139985
4	5-6	1150	6.084526	83.66	101.661009	1099.495784
5	5-6	1150	6.073698	83.66	101.661009	1099.852377

Figura 5. 19. Ejemplo de indexación de los atributos de la catenaria a los puntos de la malla

- La distancia según el Modelo B vendrá definida por (23):

$$DIST_MOD_B = \sqrt{DIS_MOD_A^2 + (POINT_ELEV - Z1)^2} \quad (23)$$

Que se calcularía mediante la “Calculadora de campo” y se almacenarían en el campo “DIST_MOD_B”.

- Almacenadas para cada punto los tres valores de distancia se calcularon en nuevos campos el valor del error absoluto porcentual para cada modelo, escribiendo las siguientes expresiones (24 y 25) nuevamente en la “Calculadora de campo”:

- Para el Modelo A, $error_Mod_A = \frac{|DIS_MOD_A - DIST_GEOM_3D|}{DIS_GEOM_3D} * 100 \quad (24)$

- Para el Modelo B, $error_Mod_B = \frac{|DIST_MOD_B - DIST_GEOM_3D|}{DIS_GEOM_3D} * 100 \quad (25)$

En la imagen inferior (Figura 5.20) se muestra una captura de pantalla de un extracto de la tabla alfanumérica correspondiente a la capa de la malla, donde puede observarse los valores de errores obtenidos para los puntos mostrados.

FID	Vano	NEAR FID	Z	Z 1	POINT ELEV	DIS MOD A	DIST MOD B	DIST GEOM 3D	error Mod A	error Mod B
8356	6-7	1221	1.725988	77.72	102.280312	999.873467	1000.168855	1004.905506	0.03	0.47
8357	6-7	1219	1.737284	77.78	102.246354	999.806831	1000.101554	1004.836533	0.03	0.47
8358	6-7	1217	1.749884	77.85	102.213354	999.741752	1000.033979	1004.767511	0.03	0.47
8359	6-7	1215	1.762484	77.92	102.181311	999.676674	999.966456	1004.698586	0.03	0.47
8360	6-7	1213	1.775084	77.99	102.150225	999.611595	999.898984	1004.629758	0.03	0.47
8361	6-7	1211	1.787684	78.06	102.120097	999.546517	999.831563	1004.561026	0.03	0.47
8362	6-7	1209	1.803117	78.15	102.090926	999.480124	999.763475	1004.492101	0.03	0.47
8363	6-7	1207	1.819197	78.26	102.062712	999.415044	999.695182	1004.423166	0.03	0.47
8364	6-7	1206	1.835276	78.37	102.035456	999.349965	999.62692	1004.354328	0.03	0.47
8365	6-7	1204	1.851355	78.48	102.009157	999.284885	999.558692	1004.285586	0.03	0.47
8366	6-7	1202	1.867435	78.59	101.983816	999.219805	999.490501	1004.216941	0.03	0.47
8367	6-7	1200	1.8884	78.65	101.959431	999.154725	999.42352	1004.147906	0.03	0.47
8368	6-7	1198	1.91048	78.69	101.936004	999.088575	999.356998	1004.078826	0.03	0.47
8369	6-7	1196	1.932559	78.72	101.913534	999.023494	999.29051	1004.009824	0.03	0.47
8370	6-7	1194	1.954638	78.76	101.892021	998.958413	999.224055	1003.940918	0.03	0.47
8371	6-7	1192	1.976718	78.80	101.871465	998.893332	999.157632	1003.872109	0.03	0.47
8372	6-7	1190	2.008778	78.76	101.851866	998.828252	999.093001	1003.802404	0.03	0.47
8373	6-7	1188	2.043112	78.69	101.833225	998.762345	999.029172	1003.732567	0.03	0.47
8374	6-7	1186	2.077446	78.62	101.815541	998.697263	998.965487	1003.662781	0.03	0.47
8375	6-7	1184	2.111178	78.53	101.798813	998.632181	998.901946	1003.593091	0.03	0.47
8376	6-7	1182	2.146114	78.45	101.783043	998.567099	998.838552	1003.523499	0.03	0.47

Figura 5. 20. Extracto de la tabla alfanumérica de la capa de la malla con valores de error de distancia

En la Figura 5.21 se muestra un ejemplo de la asociación efectuada entre los puntos de la malla y el más próximo en proyección horizontal de la catenaria. Los puntos seleccionados (representados en color cian) de la malla tienen reconocido como punto más cercano de la catenaria en proyección horizontal (en color rojo) el identificado con FID_NEAR 2202, para el cual aparecen consultados sus atributos en la ventana de identificación de la izquierda. Se han remarcado además dos puntos (en amarillo) de la selección previa, situados a diferentes distancia a la línea eléctrica.

Se observa además en sus datos asociados, la influencia significativa de la elevación de la catenaria, generando errores para el Modelo A que no la tiene en cuenta de casi un 85% para el punto más cercano a la misma. También se deduce que esta influencia se reduce notablemente con el alejamiento a la línea, pues en el segundo punto, apenas separado 12 m del primero, el error disminuye al 52.87%. En cambio, en el Modelo B que sí considera la catenaria, estos errores son casi insignificantes y se ven mucho más influenciados por el valor de la altitud ortométrica considerada para los puntos de la malla.

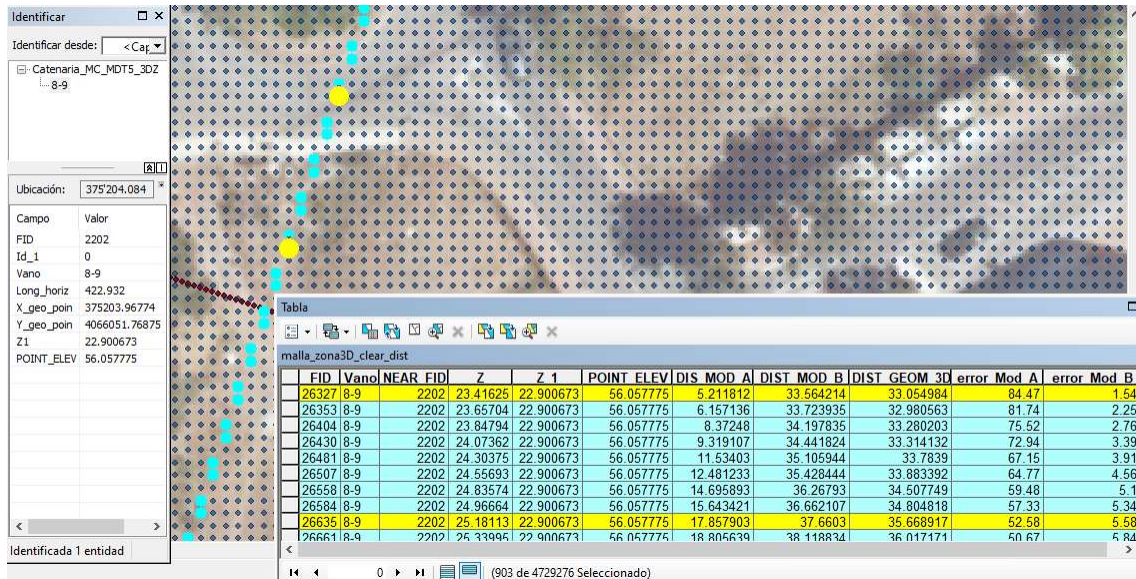


Figura 5. 21. Ejemplo de consulta de puntos de la malla seleccionados

- 9) Para generar una superficie de error del Modelo A en la zona de estudio se realizó una interpolación por el método de la distancia inversa ponderada (IDW) ya que este método es adecuado cuando la muestra es muy densa y está espacialmente ordenada (ESRI, 2016b). De la misma manera se procedió para obtener la superficie de error correspondiente al Modelo B, asignando a ambos rasters de salida una resolución de 2 x 2 m.

El diagrama de flujo de trabajo realizado queda esquematizado en la Figura 5.22.



Figura 5. 22. Diagrama de flujo de trabajo para obtener las superficies de error

Un extracto de los mapas obtenidos se recogen en la Figura 5.23 en los cuales los errores han sido tematizados por colores según diferentes rangos. Se observa como el primer modelo genera zonas de error mucho mayores que el segundo. Los mapas obtenidos para la totalidad de la zona de estudio se muestran en las figuras 5.24 y 5.25.

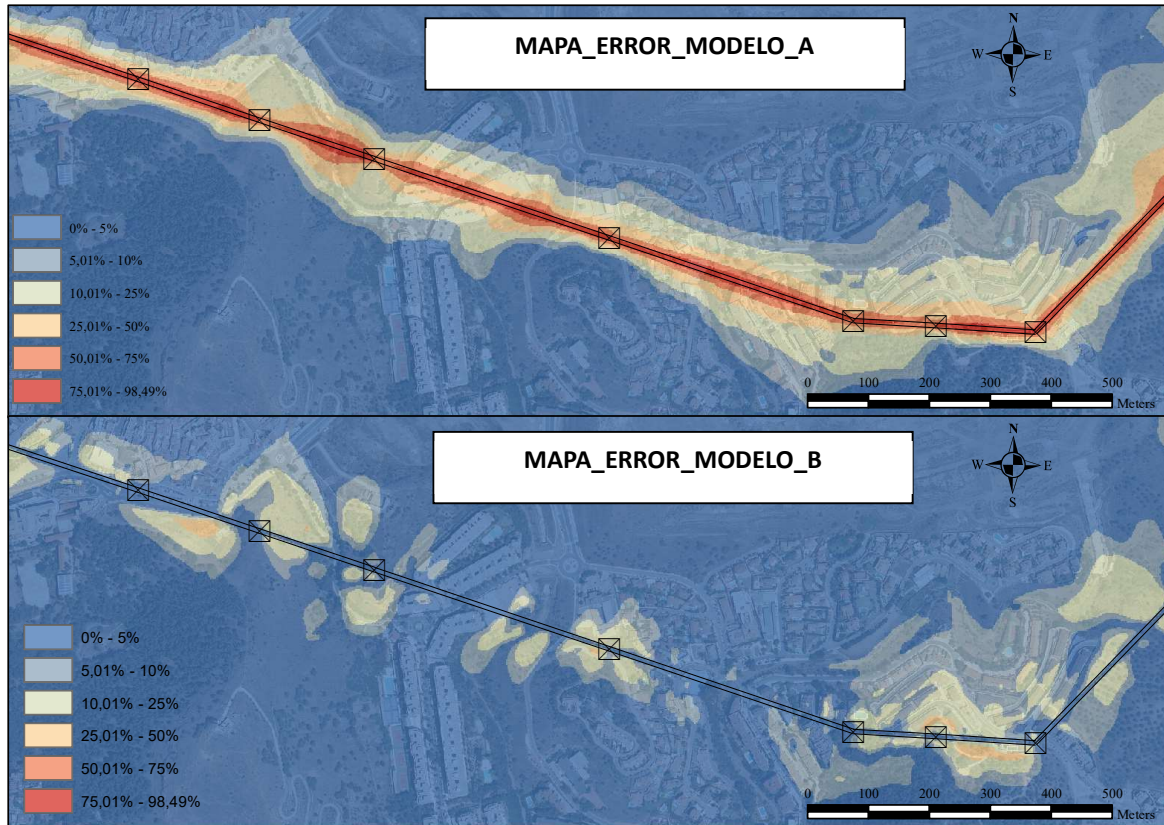


Figura 5. 23. Comparación de los mapas de error de cada de modelo



Leyenda

MAPA_ERROR_MODELO_A

- 0% - 5%
- 5,01% - 10%
- 10,01% - 25%
- 25,01% - 50%
- 50,01% - 75%
- 75,01% - 98,49%
- Linea_Montes_Centro
- Apoyos_Montes_Centro



Figura 5. 24. Mapa de error del modelo A



Leyenda

MAPA_ERROR_MODELO_B

- 0% - 5%
- 5,01% - 10%
- 10,01% - 25%
- 25,01% - 50%
- 50,01% - 75%
- 75,01% - 98,49%
- Linea_Montes_Centro
- Apoyos_Montes_Centro

N



Figura 5. 25. Mapa de error del modelo B

5.3. Resultados

El análisis de los resultados obtenidos se realizó estableciendo zonas en torno a la línea eléctrica delimitadas según diversos alejamientos horizontales a la misma que también se han aplicado en diversos estudios epidemiológicos (Bunch et al., 2014; Crespi et al., 2016; Draper et al., 2005; Pedersen, Raaschou-Nielsen, et al., 2014; Tynes & Haldorsen, 1997). Para cada zona, se obtuvo el error absoluto porcentual mínimo, máximo y medio con su desviación estándar (SD) (ver Tabla 5.4).

Se observa de forma clara como el modelo A, que obvia completamente la elevación del terreno y de la catenaria, generó en el primer cuartil errores medios cercanos al 40% pudiendo alcanzar prácticamente el 100% de error. Por otra parte, el modelo B, aunque se basa en una consideración tridimensional simplificada, rebajó en el primer cuartil el error medio al 7.14%, si bien es cierto que en algunos puntos alcanzó casi un 40%. Para el resto de los cuartiles, las diferencias entre los modelos analizados disminuyeron notablemente.

DISTANCIAS HORIZONTALES A LA LÍNEA	ERROR ABSOLUTO PORCENTUAL							
	Modelo A				Modelo B			
	% error min.	% error máx.	% error medio	SD	% error min	% error máx.	% error medio	SD
0-49	2.45	99.85	39.83	25.80	0.00	39.71	7.14	6.65
50-99	0.63	36.16	7.43	6.28	0.00	21.99	5.13	4.16
100-199	0.16	18.04	2.58	2.93	0.00	16.28	2.18	2.34
200-299	0.03	6.35	1.10	1.11	0.00	5.98	0.91	0.94
300-499	0.00	4.79	0.53	0.57	0.00	5.39	0.44	0.55
500-749	0.00	2.06	0.28	0.27	0.00	2.29	0.24	0.25
750-1000	0.00	0.85	0.22	0.21	0.00	0.85	0.20	0.20

Tabla 5. 4. Análisis del error de los Modelos A y B según distancias horizontales a la línea

El gráfico de los valores de errores absolutos máximos y medios de cada sustituto de la mínima distancia geométrica en cada cuartil (Figura 5.26) mostró para nuestro estudio que, la elección de un modelo u otro hubiera sido indiferente a partir de los 100 m, ya que la precisión de las estimaciones de los campos magnéticos hubiera sido del mismo orden para ambas simplificaciones de la distancia. Así mismo, también evidenció que el uso de cualquiera de los sustitutos de la distancia geométrica para nuestra zona de

estudio, únicamente podrían tener validez a partir de los 200 m a la línea, donde los errores absolutos quedaban en valores cercanos al 5%.

Nótese que la representación gráfica no se realiza de forma simétrica porque tanto la tabla como la gráfica recoge los resultados de forma conjunta para ambos lado de la línea según cada cuartil, ya que el terreno no es simétrico a cada lado de la línea.

Así mismo, al objeto de conocer con más detalle el impacto territorial de los errores, se analizó la cantidad de superficie afectada por diversos rangos de error absoluto porcentual en las distintas zonas definidas. Concretamente, se establecieron rangos de error de 0-5%, 5-10%, 10-25%, 25-50% y 50-100%, y se obtuvo el porcentaje de superficie sometida a estos valores de error en las zonas a 50 m a la línea, entre 50 y 100 m, 100 y 200 m, 200 y 300 m, 300 y 400m, 400 y 500m, 500 y 750 m, y 750 y 1000 m.

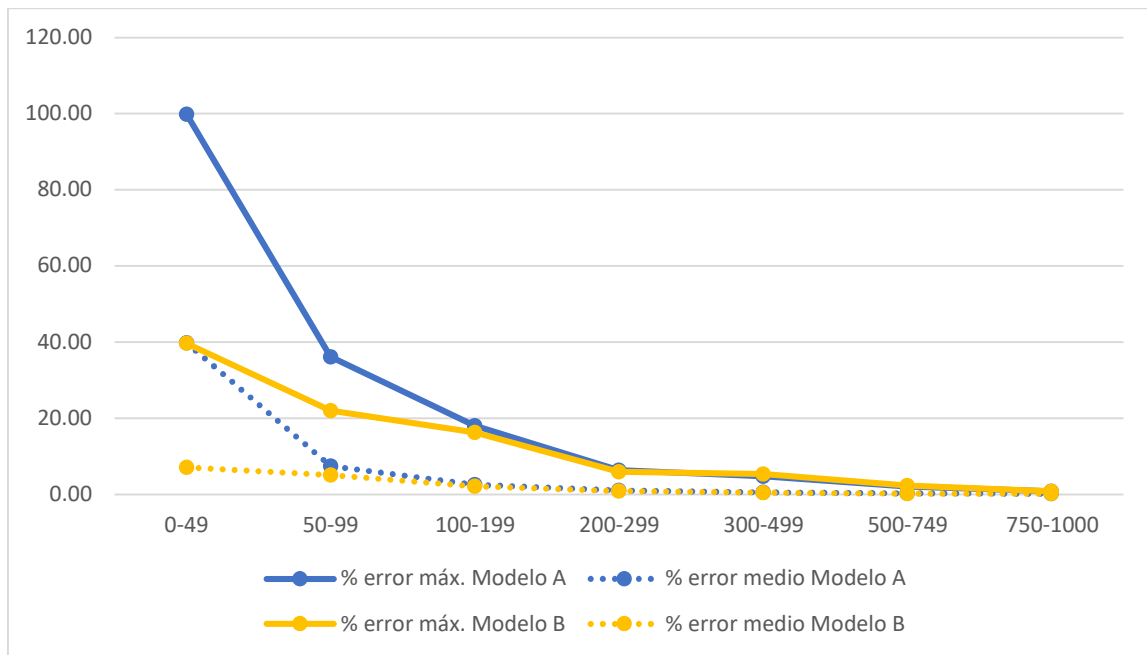


Figura 5. 26. Gráfica de valores absolutos porcentuales máximos y medios según la distancia horizontal a la línea

Para ello se generaron las áreas de influencia mediante la herramienta “Zona de influencia en anillos múltiples” según las distancias horizontales a la línea descritas. Posteriormente, mediante la operación “Extracción por máscara” aplicada a cada modelo y para cada área de influencia, seguida de una operación de “Reclasificación” sobre cada

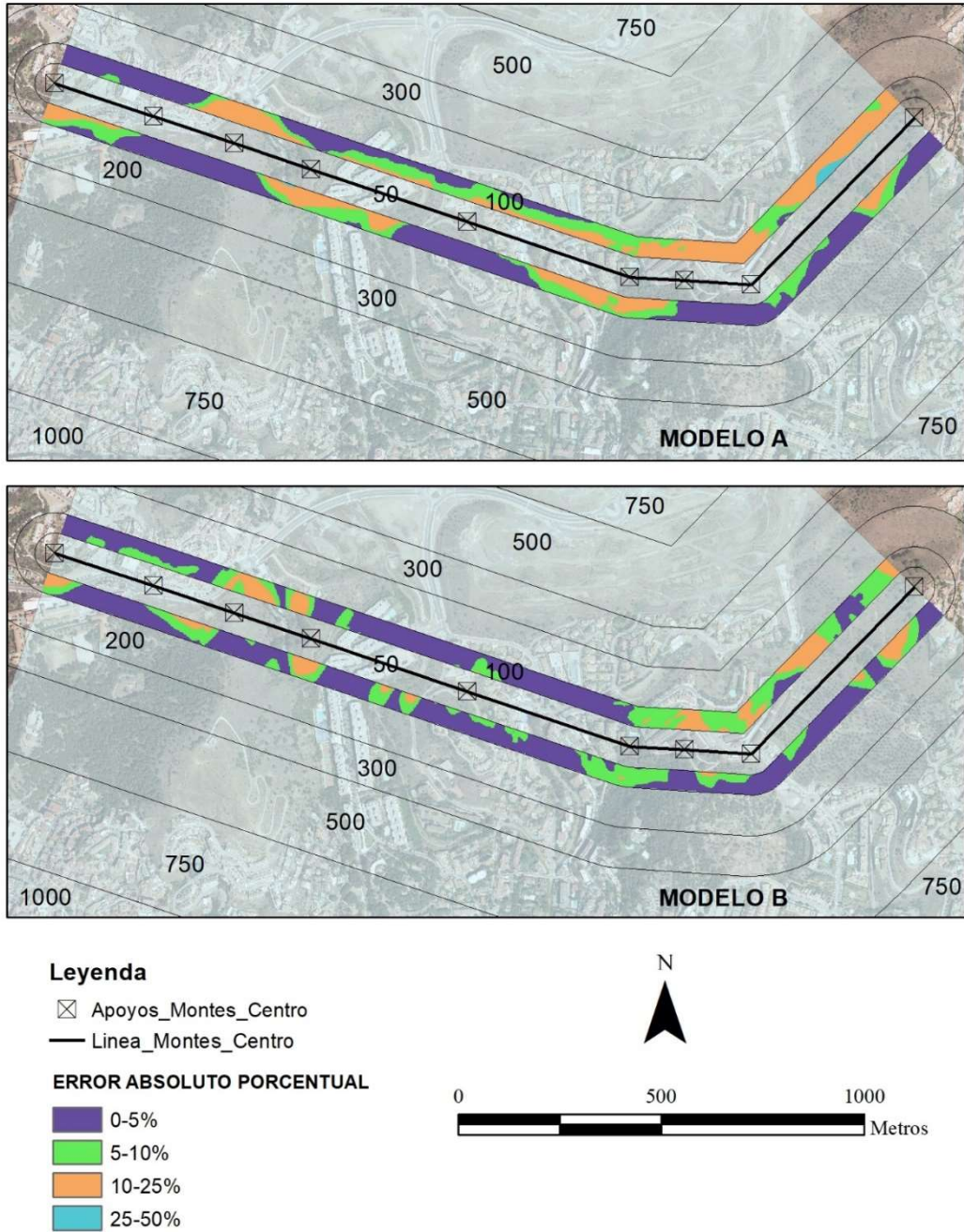


Figura 5. 27. Mapa de error absoluto porcentual para los Modelos A y B en la zona de 50 a 100 m a la línea eléctrica

anillo de superficie obtenida, se obtendrían las cantidades de superficies afectadas en cada caso. En la imagen inferior (Figura 5.27) se muestra un ejemplo de la extracción de los mapas de errores para cada modelo de la zona comprendida entre los 50 y 100 m a la línea.

Los resultados para el Modelo A (Tabla 5.5) evidenciaron que dentro de los primeros 50 metros a la línea, casi un 30 % de esta zona estaba afectada por errores de la distancia iguales o superiores al 50%, lo que conllevaría errores en el cálculo del campo magnético de un 100 % al 200%. Porcentajes de superficie similares se obtuvieron con errores importantes, de entre un 25 y un 50%, y también para errores de entre un 10 y un 25%. En apenas el 10% del territorio de esta zona, los errores generados al sustituir la distancia geométrica por la horizontal quedarían por debajo del 10%.

PORCENTAJE DE TERRITORIO (%): MODELO A

DISTANCIAS HORIZONTALES A LA LÍNEA (m)	Error absoluto porcentual				
	0-5 %	5-10 %	10-25 %	25-50 %	50-100 %
0-49	5.59	6.78	28.38	30.24	29.00
50-99	42.84	24.67	31.46	1.03	0.00
100-199	82.98	14.18	2.84	0.00	0.00
200-299	99.21	0.79	0.00	0.00	0.00
300-499	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00
500-749	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00
750-1000	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabla 5. 5. Porcentaje de territorio afectado el Modelo A según distancias horizontales a la línea eléctrica

Sin embargo, al alejarnos 50 metros más de la línea, se observó como aproximadamente el 70% de la superficie comprendida entre los 50 y 100 m sí quedaría por debajo del 10% de error. Para este cuartil de distancia, se observó también que la superficie sometida a errores de entre un 10 y un 25% se mantuvo en el 30%, lo que se traduce en que la inmensa amplitud de la superficie afectada por errores especialmente elevados en el primer cuartil de distancia, al incrementarse la distancia a la línea, se redujo de forma muy significativa. Es destacable, además, que apenas el 1% de la superficie comprendida entre los 50 y 100 m a la línea se vio afectado por errores mayores al 25%.

Entre los 100 y 200 m, un 14 % de la superficie presentaba aún errores comprendidos entre un 5 y un 10%. Únicamente a partir de los 200 m, podría considerarse tal y como ya se desprendió de los análisis anteriores que sería posible omitir los desniveles para la determinación de distancias geométricas precisas.

Para el Modelo B, los resultados (Tabla 5.6) mostraron que, en la zona más próxima a la línea, prácticamente no se identificaron zonas con errores superiores al 25%, quedando prácticamente la mitad del territorio con errores inferiores al 5%. No obstante, para evitar errores de entre un 10 y un 25% en los valores de distancia simplificadas, los resultados evidencian que este modelo requeriría una supervisión de un 25 % del terreno a menos de 50 m a la línea, y de casi un 13% en la franja de 50-100 m a la línea. Respecto al Modelo A, se observa que la cantidad de superficie afectada comienza a ser similar en ambos casos a partir de los 100 metros, siendo las diferencias entre ambos modelos prácticamente imperceptibles a partir de los 200 m.

PORCENTAJE DE TERRITORIO (%): MODELO B

DISTANCIAS HORIZONTALES A LA LÍNEA (m)	Error absoluto porcentual				
	0-5 (%)	5-10 (%)	10-25 (%)	25-50 (%)	50-100 (%)
0-49	49.01	23.88	25.30	1.81	0.00
50-99	59.03	28.10	12.88	0.00	0.00
100-199	88.01	10.70	1.30	0.00	0.00
200-299	99.40	0.60	0.00	0.00	0.00
300-499	99.98	0.02	0.00	0.00	0.00
500-749	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00
750-1000	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabla 5. 6. Porcentaje de territorio afectado el Modelo B según distancias horizontales a la línea eléctrica

Por último, es importante señalar que la sustitución de la distancia real entre dos puntos por la componente horizontal de la misma siempre generará estimaciones de la inducción magnética a la baja. Sin embargo, cuando el desnivel del terreno es considerado como el existente bajo la línea (Modelo B), los errores relativos porcentuales oscilaron entre un -32,33% y un 39,71%, lo que se traduciría en errores de CM tanto por exceso como por defecto.

5.4. Discusión

Otros autores han investigado la influencia de la altura de los conductores sobre el suelo en los valores de campo magnético. Por ejemplo, para una línea típica de 500 kV, se determinó que a partir de los 50 m la altura de los cables deja de tener influencia, para líneas de 230 y 132 kV, a los 20 m (Cruz-Romero, 2000) y para una línea de 400 kV, a partir de los 40 m (Kostyszyn & Miśków, 2022). Sin embargo, estos estudios han considerado siempre el terreno plano y horizontal y tampoco especifican qué valor de error del campo magnético consideran como despreciable. En el siguiente gráfico (Figura 5.28), se muestran los valores de campo magnético en perfiles transversales a la línea según diversas separaciones de los cables respecto al suelo para una línea típica inglesa de 400 kV.

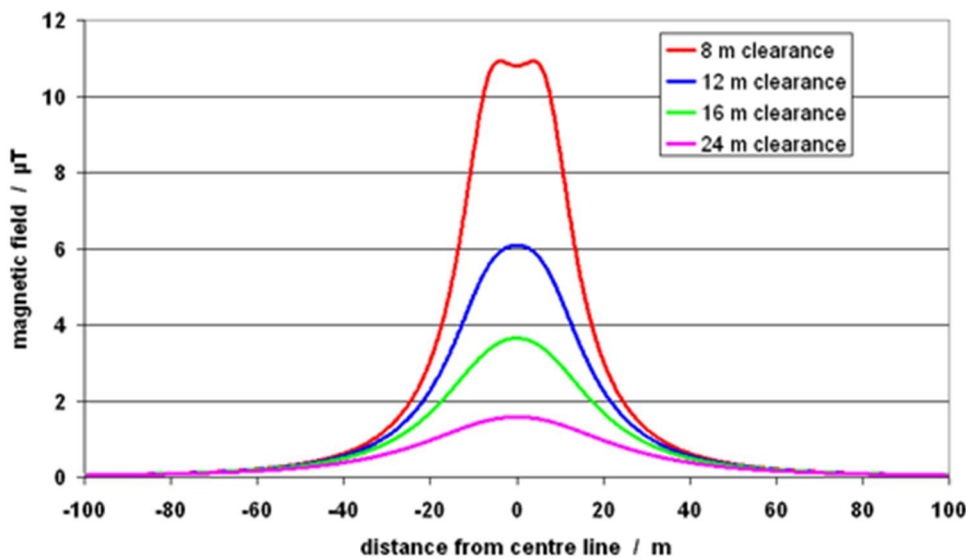


Figura 5. 28. Gráfica del valor del campo magnético según la altura de los cables al suelo en una línea de 400 kV. Fuente: adaptado de EMFs.info, 2023

Se observa también como a partir de los 40 metros las diferencias disminuyen notablemente haciéndose prácticamente nulas a partir de los 80-100m, pero igualmente, en un terreno sin desniveles.

Por este motivo, además de que debido a que el campo magnético depende también de otro parámetro especialmente importante como es la intensidad de la corriente circulante, los resultados de este trabajo no son del todo comparables con los de estas investigaciones. Sin embargo, los errores obtenidos al haber analizado las

simplificaciones de distancia en una zona con orografía compleja evidencian que no es posible generalizar las conclusiones de los otros autores, si no es un entorno de idénticas condiciones.

También es conveniente considerar no sólo que las irregularidades del terreno pueden aportar errores importantes en los valores de distancia, sino que además cuando existe un desnivel importante entre los apoyos de un vano, el ángulo del plano del campo magnético (perpendicular a la línea) también se ve fuertemente influenciado, lo que aportaría aún más error a estimaciones del campo magnético cuando la catenaria es obviada. Este efecto se evidencia de forma más clara en el mapa de error correspondiente al Modelo B, en el que se ha considera una distancia tridimensional pero derivada a partir de la proyección horizontal y no de la geométrica real, por lo que el ángulo de la pendiente de la catenaria le afecta de igual manera al Modelo B que al A. En este último modelo, la orografía tiene un mayor peso en el error, pero en el Modelo B, como esta se ha considerado parcialmente, es posiblemente esta falta de consideración del ángulo la que justifica la evidencia de mayor errores en el entorno de las torres eléctricas, que es donde este ángulo es mayor.

5.5. Conclusiones del capítulo

Este estudio es un ejemplo de que la simplificación de los valores de distancia en estudios epidemiológicos de exposición residencial a campos magnéticos generados por líneas eléctricas aéreas de alta tensión puede conllevar importantes errores en los valores de intensidad del campo magnético generados, y que la consideración del relieve del terreno es indispensable en el entorno de 100 m a la línea aun cuando la catenaria y su separación del suelo es incluida en el modelo.

Aunque la zona urbana analizada supone un área territorial muy pequeña en comparación con los estudios que se desarrollan sobre grandes poblaciones, sería posible optimizar los tiempos de procesamiento de las operaciones espaciales generando superficies con pasos de malla más grandes o con discretizaciones menos finas de la catenaria, si bien sería necesario comprobar la precisión de los modelos que se generen con estos parámetros. Por otra parte, este procedimiento podría aplicarse sólo en zonas con orografías complejas como la investigada, permitiendo detectar de forma rápida las

zonas críticas que deban ser estudiadas de forma mucho más precisa al objeto de obtener en ella valores realmente fieles de la inducción magnética generada por las LEAAT.

Al haber obtenido un modelado preciso de la catenaria, y dadas las capacidades de análisis espacial de los SIG 3D, sería posible evaluar la influencia del ángulo de la catenaria sobre los errores al asumir diferentes modelos, como los aquí estudiados.

Por otra parte, la metodología aquí desarrollada ha proporcionado mapas de error en forma de cobertura para los modelos de distancias más aplicados en la literatura científica relacionada con la exposición residencial a CM. Algunos investigadores (Bessou et al., 2013) han aplicado factores de corrección basados en los desniveles del terreno a los valores simplificados de distancias. Estas coberturas podrían ser un punto de partida para la determinación de estos factores. Por último, el mismo procedimiento que se ha expuesto permite obtener mapas continuos precisos de distancia geométrica y a partir de estos, se podrían obtener mapas continuos de valores de inducción magnética a la cota real del terreno.

Los resultados de este trabajo se expusieron en la 4ª Conferencia Internacional sobre Geoinformática y Análisis de Datos (ICGDA) en abril de 2021 y se encuentran recogidos en las actas correspondientes, siendo el título de la comunicación “Error analysis of the simplification of 3D distances to overhead power lines” (Miravet-Garret et al., 2021a).

6. MODELADO DE SUPERFICIES DE CAMPO MAGNÉTICO MEDIANTE UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA 3D

6.1. Introducción

6.1.1. Justificación

A lo largo de décadas de investigación acerca de los posibles efectos sobre la salud de la exposición residencial a campos electromagnéticos generados por LEAAT, los estudios epidemiológicos han adoptado diversas formas de caracterización de dicha exposición. Entre estas conceptualizaciones de la exposición, las basadas en cálculos de la inducción magnética están consideradas como una de las más sólidas y fiables.

Estos estudios epidemiológicos normalmente se desarrollan en ámbitos territoriales importantes, por lo que deben enfrentarse a la complejidad que conlleva abordar cientos o miles de kilómetros de líneas eléctricas que recorren las zonas de estudio. Debido a esto, en su diseño metodológico asumen determinadas simplificaciones de la realidad, siendo una de las más habituales que el trazado de la catenaria que describen los cables se aproxime mediante valores predeterminados de la altura libre de los cables y mediante valores de la flecha máxima. Por otra parte, también suele asumirse que el terreno es completamente plano y horizontal, tal y como se analizó con detalle en un trabajo previo descrito en el Capítulo 5 de esta tesis doctoral. Algunas metodologías consideran el relieve del terreno, pero sólo a menos de 50 m a la línea mediante la inspección exhaustiva de mapas topográficos, y para las zonas con curvas de nivel pronunciadas, sí se toman valores reales de altura libre y flecha máxima mediante visitas al lugar de interés (Swanson, 2008; Tynes & Haldorsen, 1997). Otros autores han realizado conceptualizaciones tridimensionales más completas, obteniendo los datos necesarios de las líneas eléctricas y de las distancias reales entre los domicilios donde se debía calcular el CM mediante telémetros y GPS para todos los puntos de cálculo (Vergara et al., 2015), lo que supone una inversión en recursos y tiempo considerable. Una solución que evita los trabajos de campo en este sentido es la realizada por Bessou et al., (2013) que incorporan la topografía a su modelo de estimación de la exposición aplicando un

factor de corrección a los valores de CM obtenidos previamente sin consideración alguna de la elevación, si bien no deja de ser una aproximación.

Para realizar los cálculos de la inducción magnética, estos estudios recurren a programas informáticos comerciales específicos (Bessou et al., 2013; Kheifets et al., 2015; Tynes & Haldorsen, 1997; Vergara et al., 2015) o a otros desarrollados “ad-hoc” por las empresas encargadas de gestionar las líneas eléctricas en cuestión (Olsen et al., 1993; Pedersen, Raaschou-Nielsen, et al., 2014; Swanson, 2008). En el primer caso, se requiere un manejo avanzado de esos programas ya que no siempre ofrecen interfaces o aplicaciones sencillas para la entrada de datos. Por otra parte, los que presentan mayores funcionalidades y mayor capacidad de reproducir con elevada precisión el entorno de estudio suele conllevar también un elevado coste económico. Por estos motivos, estas soluciones de cálculo no siempre son accesibles para la comunidad científica en general como tampoco lo son los programas particulares de empresas.

En el ámbito de la salud ambiental, los Sistemas de Información Geográfica han sido una herramienta fundamental para la generación y el análisis de datos y gozan de una importante comunidad de usuarios (ESRI, 2011). Concretamente en estudios de contaminación electromagnética, dentro de sus las funcionalidades como proveedores de datos, los SIG se han utilizado para la geocodificación de los domicilios de casos y control (Baldi et al., 2011; Faure et al., 2017; Kheifets et al., 2015) y para la estimación de distancias horizontales entre estos domicilios y las líneas eléctricas (Crespi et al., 2016; Pedersen, Raaschou-Nielsen, et al., 2014). También las capacidades de representación cartográfica de los SIG se han utilizado para representar gráficamente los resultados de valores de inducción magnética calculados con otros programas específicos (Comelli et al., 2007; Najjar et al., 2009). Otros investigadores han integrado en un entorno SIG aplicaciones interactivas para calcular valores de intensidad de CM (Turgeon et al., 1998) o incluso para generar superficies de CM mediante generadores de malla de elementos finitos 3D (Joseph et al., 2018), si bien la orografía no fue considerada. También las funcionalidades de análisis espacial mediante combinación de capas geográficas han permitido evaluar la relación entre la leucemia infantil con densidad de tráfico y la exposición a CM (Reynolds et al., 2001).

En los últimos años el desarrollo de la tecnología LIDAR permite disponer para grandes superficies territoriales de modelos digitales del terreno de una precisión y nivel de detalle muy superiores a los que podían generarse años atrás mediante métodos tradicionales (Leigh et al., 2009).

En este trabajo se aborda el objetivo principal de esta tesis doctoral, aplicando las capacidades actuales de análisis y modelado tridimensional de los SIG para obtener un modelo que proporcione mapa de valores de intensidad de CM generados por LEAAT aplicable a estudios epidemiológicos de exposición residencial a estos campos, donde la catenaria que describen los cables es reproducida fielmente, así como el relieve del terreno incluso en zonas con orografía compleja. Este modelo ha sido validado en una zona que reúne estas características, concretamente en un barrio residencial de la capital de Málaga (España). Para dicha validación, se pudo contar con datos sobre la línea eléctrica que atraviesa dicha zona facilitados por su empresa gestora. A partir de estos datos se pudo analizar la capacidad de simulación de diversas superficies de CM obtenidas a partir de dos MDT de distinta precisión, lo cual constituía otro de los objetivos de esta tesis doctoral secundario al modelado de superficies de CM. Los programas informáticos utilizados en todo el procedimiento, el sistema de información geográfica ArcGIS y la hoja de cálculo Microsoft Excel no se repliegan a personal con formación específica en ingeniería eléctrica, sino que son ampliamente utilizados en el ámbito de la epidemiología.

Por otra parte, los resultados generados en forma de un campo continuo de valores permiten, además de obtener valores de exposición a CM en cualquier localización geográfica, realizar análisis multicriterio espaciales para la evaluación de riesgos ambientales y de salud al poder combinar esta capa con otras que representen otros contaminantes ambientales también de naturaleza continua. Así mismo, constituyen una fuente informativa que podría ponerse a disposición de la población y combinarlos con otros mapas al objeto de establecer espacios que puedan ser declarados como “zonas blancas” libres de radiación y contaminación.

6.1.2. Zona de estudio

El lugar donde se llevó a cabo este estudio coincidió con la investigación previa sobre el error de la simplificación de distancias cuando estas son asumidas como indicadores de la exposición residencial a CM de FEB, la cual ha sido detallada en el Capítulo 5 de esta tesis doctoral. Ambas zonas coincidieron exactamente tanto en la superficie territorial abarcada como en todos los tramos de líneas eléctricas aéreas implicados.

Para esta nueva investigación, esta misma zona de estudio resultó también de especial interés debido a su carácter residencial y a su distribución urbanística sobre una orografía muy variable, ya que el objetivo principal establecido era generar superficies de CM con la consideración del relieve del terreno y de la elevación real de la catenaria, y que además fueran suficientemente precisas en zonas urbanas complejas.

6.2. Metodología

6.2.1. Fuentes de información: datos tridimensionales, vectoriales e imágenes aéreas

Las fuentes de información utilizadas para el modelado de la zona de estudio y posterior análisis espacial, así como las utilizadas únicamente con fines de representación gráfica se detallan a continuación. Algunos de estos datos cartográficos son idénticos a los utilizados en la investigación previa.

Ortofotografías

Mosaico de ortofotos del PNOA

Descripción: Ortofoto “PNOA_MA_OF_ETRS89_HU30_h50_1053” de la serie “máxima actualidad” en formato “ecw” con una resolución de 35 cm por píxel.

Fuente: Plan Nacional de Ortografía Aérea (PNOA) con fecha de creación en el año 2016 en sistema de referencia geodésico ETRS89 y proyección UTM en el huso 30. Proporcionados mediante descarga gratuita por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) de España.

Cartografía en formato vectorial

Cartografía catastral SIG

Descripción: Parcelas catastrales de suelo urbano y rústico, subparcelas urbanas y rústicas que representan los volúmenes edificados dentro de una parcela, y límites administrativos. En formato “shapefile” con sistema de referencia ETRS89, proyección UTM en el huso 30.

Fuente: Sede Electrónica de Catastro del Gobierno de España.

Cartografía tridimensional

Modelo Digital del Terreno (MDT) de 5 x 5 m

Descripción: Cobertura ráster de las alturas ortométricas del terreno “PNOA_MDT05_ETRS89_HU30_1053_LID” sin edificaciones ni vegetación de 5 m de resolución en formato ASCII matriz ESRI (“asc”) con una raíz del error medio cuadrático en las elevaciones $RMSz = 0.5$ m.

Fuente: Plan Nacional de Ortografía Aérea (PNOA) con fecha de creación en el año 2015 en sistema de referencia geodésico ETRS89 y proyección UTM en el huso 30. Proporcionados mediante descarga gratuita por el Instituto Geográfico Nacional (IGN).

Modelo Digital del Terreno (MDT) de 25 x 25 m

Descripción: Cobertura ráster de las alturas ortométricas del terreno “PNOA_MDT25_ETRS89_HU30_1053_LID” sin edificaciones ni vegetación de 25 m de resolución en formato ASCII matriz ESRI (“asc”).

Fuente: Plan Nacional de Ortografía Aérea (PNOA) con fecha de creación en el año 2015 en sistema de referencia geodésico ETRS89 y proyección UTM en el huso 30. Proporcionados mediante descarga gratuita por el Instituto Geográfico Nacional (IGN).

Modelo Digital de Superficies (MDS)

Descripción: Cobertura ráster denominada “PNOA_MDS05_ETRS89_HU30_1053_LID.asc” de 5 m de resolución en formato ASCII matriz ESRI (“asc”). Recoge las alturas ortométricas mayores correspondientes

tanto al terreno como a las edificaciones, la vegetación, así como cualquier otro obstáculo sobre el mismo.

Fuente: Plan Nacional de Ortografía Aérea (PNOA) con fecha de creación en el año 2018 en sistema de referencia geodésico ETRS89 y proyección UTM en el huso 30. Proporcionados mediante descarga gratuita por el Instituto Geográfico Nacional (IGN).

6.2.2. Método de cálculo del campo magnético

El método utilizado para el cálculo de la intensidad campo magnético B (μT) corresponde a la expansión en series de la ley de Biot-Savart aplicada a conductores rectilíneos indefinidos (Kaune & Zaffanella, 1992), que para diversas posiciones relativas de las fases en una línea de doble circuito vertical viene dada por (26):

$$B = \mu_0 d I_g \sqrt{3} / 2\pi r^2 \quad \text{para } r \gg d \quad (26)$$

Donde μ_0 representa la permeabilidad magnética del vacío ($4\pi \cdot 10^{-4} \text{ TA/m}$), d es la separación entre fases (m), I_g representa un término que opera los valores de intensidades (A) en ambos circuitos según la configuración de las fases (g) y r es la distancia (m) entre el punto de cálculo y la línea, asumiendo como posición de la línea la del centro geométrico de sus conductores para minimizar el error de este método de cálculo del CM (Cruz-Romero, 2000).

Este método de cálculo introduce un error al sustituir por una recta la curva real que describen los cables. Para reducirlo, se adoptó la propuesta realizada por Mamishev et al. (1996) que consiste en hacer coincidir la altura de la recta con la de la catenaria. En este trabajo, esta altura se definió como la diferencia de elevación entre el punto de cálculo y el de la catenaria situado en el plano que pasando por dicho punto de cálculo es transversal a la dirección misma (Figura 6.1), esto es, la correspondiente a la componente vertical de la mínima distancia geométrica. De esta forma también se garantiza que los puntos donde se calcula el campo corresponden a una trayectoria perpendicular a la dirección de los conductores. Estos puntos de cálculo, siguiendo las pautas generales para las mediciones y cálculos de campos magnéticos, se ubican a 1 metro sobre la cota del suelo según las normas IEEE Std 644-1994 (IEEE, 1994) y UNE 215001:2004 (AENOR, 2004).

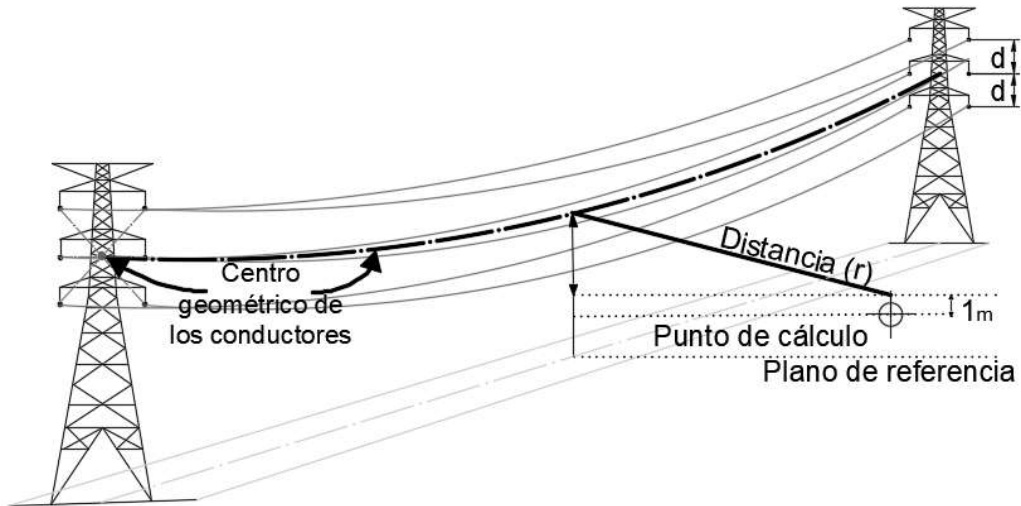


Figura 6. 1. Representación de la posición relativa entre un punto de cálculo y el centro geométrico de los conductores de la catenaria

La empresa e-Distribución Redes Digitales SL, responsable de la línea eléctrica, facilitó la información relativa a la intensidad circulante por ambos circuitos para el periodo de tiempo en el cual se llevarían a cabo los trabajos de validación de las superficies modeladas. Según los datos proporcionados, ambos circuitos de la línea eléctrica portaban corrientes de secuencia positiva quedando la variación diaria recogidos en el diagrama de la Figura 6.2.

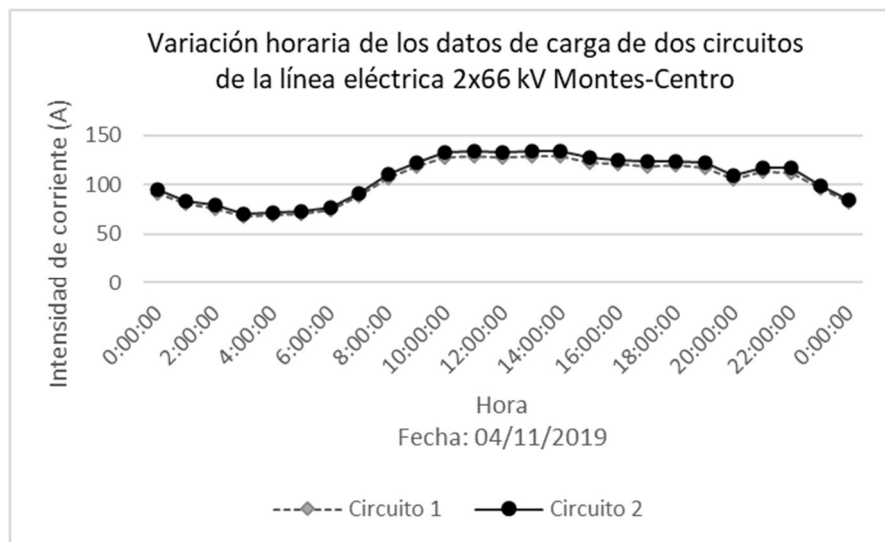


Figura 6. 2. Variación horaria de la intensidad de corriente en cada circuito de la línea eléctrica

Otras corrientes, como las inducidas en tierra o las corrientes desequilibradas de los circuitos no fueron tenidas en cuenta.

El método de cálculo del CM basado en la descomposición en series presenta como ventajas frente a otros métodos sencillez de aplicación al no requerir integraciones analíticas ni numéricas y, por consiguiente, bajo coste computacional.

6.2.3. Modelado de la zona de estudio

Para poder introducir valores de distancias geométricas precisas en los cálculos del campo magnético, tanto las altitudes ortométricas del terreno como la de cualquier punto de la catenaria fueron obtenidas a partir del modelo digital del terreno de alta precisión de 5 x 5 m de resolución denominado “PNOA_MDT05_ETRS89_HU30_1053_LID” (de ahora en adelante “MDT05”). A partir de este se derivaría la altitud ortométrica de cualquier punto del suelo de la zona de estudio y de la misma manera, se obtendría la altitud ortométrica de las bases de los apoyos eléctricos. El procedimiento para modelar la catenaria mediante la discretización de esta en puntos espaciados 0.5 m, se realizó de forma idéntica a la descrita en el apartado 5.2.2.2 “Modelado de la catenaria: digitalización de la línea eléctrica aérea en 3D” del Capítulo 5 de esta tesis doctoral.

Dada que las altitudes se derivarían de un MDT, se consideró de especial interés profundizar en la posible afectación de la resolución de un MDT en los valores de intensidad del campo magnético. Por tanto, se realizó otro modelado de la zona de estudio a partir de un modelo digital del terreno de 25 x 25 m de resolución, siguiendo el trabajo realizado por Bürgi et al., (2017). La utilización de un modelo digital del terreno con un tamaño de celda mayor conlleva las ventajas asociadas al procesado de archivos más ligeros para una misma superficie, lo cual es importante en estudios llevados a cabo sobre grandes extensiones territoriales. El modelado del relieve, así como de la catenaria también siguió exactamente la metodología descrita basada en el MDT de 5m de tamaño de celda, pero en este caso, con el MDT denominado “PNOA_MDT25_ETRS89_HU30_1053_LID” que a efectos prácticos se denominará “MDT25”. De esta forma, según se derivara la altura ortométrica de las bases de las torres eléctricas de un modelo u otro, se obtuvieron dos modelados de la catenaria, las

cuales se pueden observar en la figura inferior (Figura 6.3), en la que el terreno que aparece corresponde a la superficie representada a partir del MDT 5x5m.

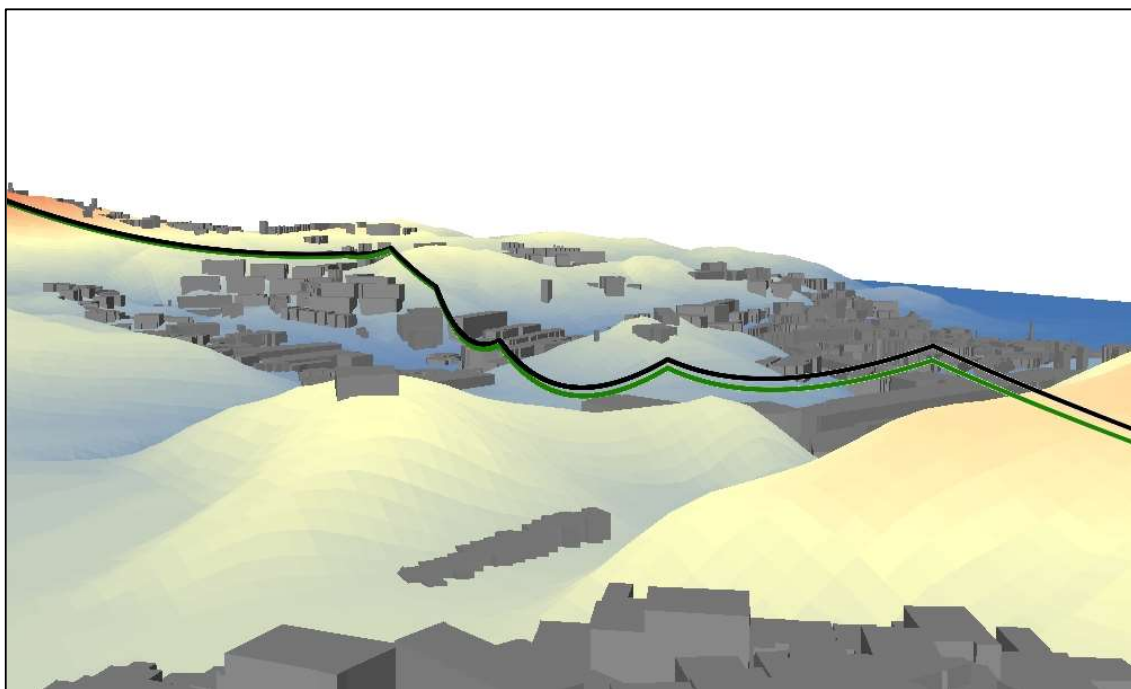


Figura 6.3. Representación tridimensional de la catenaria obtenida a partir del MDT 05 (color negro) y a partir del MDT 25 (color verde)

La inclusión de los edificios, elevados sobre la base de su huella dada por la cartografía vectorial del catastro, se utilizó simplemente para introducir elementos de referencia que aportaran más valor a la representación gráfica. Los valores de elevación de estos edificios se obtuvieron del modelo digital de superficies “PNOA_MDS05_ETRS89_HU30_1053_LID.asc”.

6.2.4. Modelado de la superficie de campo magnético

Se modelaron tres superficies de campo magnético, obteniéndolas a partir de mallas de puntos de diferente espaciado, al objeto de optimizar los tiempos de procesado: malla de 5 x 5 m y otra de 10 x 10 m de rejilla con alturas ortométricas extrapoladas del MDT05, y otra malla de 25 x 25 m de espaciado cuyas alturas se obtendrían a partir del MDT de 25 m de resolución. Estas alturas se operarían aplicando el método de cálculo del CM descrito anteriormente para que cada punto representara los valores de la intensidad del campo magnético a 1 metro sobre la cota real del terreno, respetando así la posición estándar recomendada para las medidas de campo magnético (IEEE Std 644-1994

[IEEE,1994]; UNE 215001:2004, [AENOR, 2004]). Posteriormente, mediante un proceso de interpolación espacial de cada malla, se obtendría la correspondiente superficie de valores de inducción magnética. El procedimiento seguido se recoge en los siguientes pasos, algunos de ellos comunes al trabajo realizado sobre el análisis de distancias:

- 1) Se delimitó la zona de estudio aplicando una “Zona de Influencia” de 1000 m a cada lado de la línea obteniendo la capa “Zona.shp”.
- 2) Mediante la herramienta “Crear Red” y utilizando como plantilla de extensión la capa correspondiente a la delimitación de la zona definida en el paso anterior, se crearon tres nuevas capas de puntos: “malla5x5_zona.shp”, “malla_10x10_zona.shp” y “malla_25x25_zona.shp” en la que cada una representaría la correspondiente rejilla, obteniendo para la primera 189165 puntos, 47303 para la segunda y 7558 para la tercera.
- 3) Se asignó a cada punto la altura ortométrica del terreno correspondiente a su ubicación mediante la herramienta “Agregar información de superficie”. Esta herramienta aplica el método de interpolación bilineal, que calcula el valor de la altitud a partir de las cuatro celdas más cercanas al punto, siendo el procedimiento más adecuado para el remuestreo de valores de elevación (ESRI, 2016a). Para las dos mallas de mayor resolución, estas alturas se obtuvieron del MDT05 y para la malla de 25 x 25 m, se utilizó el MDT25, quedando todos los valores registrados en un campo denominado Z en las tablas alfanuméricas correspondientes a cada capa nueva, denominadas “malla5X5_zona_mdt5.shp”, “malla10X10_zona_mdt5.shp” y malla25X25_zona_mdt25.shp”. En la figura inferior (Figura 6.4) puede observarse cada malla de puntos sobre el MDT correspondiente.

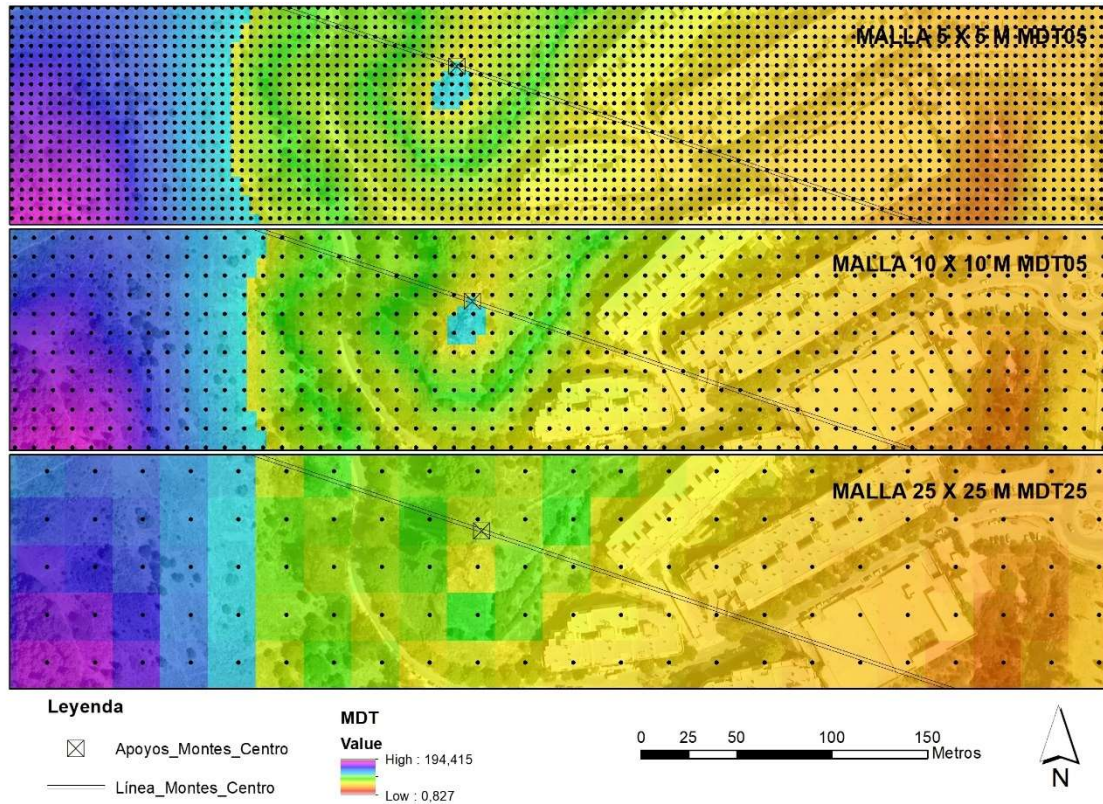


Figura 6. 4. Comparación de las mallas de 5, 10 y 25 m sobre los MDT

- 4) Para definir en cada punto su altura a un metro sobre la altura del suelo que se había asignado, se creó en cada tabla un nuevo campo denominado “Zmas1” en el cual, mediante la “Calculadora de campo” se obtendría la altitud correspondiente utilizando la expresión: “Zmas1= Z +1”.

- 5) La conversión de los puntos de la malla en entidades tridimensionales se realizó a partir del campo “Zmas1”, definiendo este como la coordenada de elevación de cada uno mediante la herramienta “De entidad a 3D por atributo”. Las capas obtenidas tras esta operación se nombraron “malla5x5_zona3dmdt5.shp”, “malla10x10_zona3dmdt5.shp” y “malla25x25_zona3dmdt25.shp”

- 6) Para poder calcular el valor de la intensidad del campo magnético en cada punto, previamente era necesario obtener el valor de la distancia geométrica desde cada uno al tramo de línea eléctrica aérea más próximo. Esto se solventó utilizando, igual que para el trabajo de análisis de distancias, la herramienta de proximidad

tridimensional “Cercano a 3D”. El valor de dicha distancia quedó registrado en el campo “NEAR_DIST_3D”. Para la rejilla de 25x25 se obtendría la distancia a la catenaria modelada a partir del MDT de igual resolución.

- 7) Se creó otro campo denominado “CM” donde se calcularían con la “Calculadora de campo” los valores de intensidad magnética según la formulación descrita en el apartado 6.2.2 de este capítulo, promediando la intensidad de corriente en los circuitos. En la Figura 6.5 se recoge una captura de pantalla correspondiente a una selección de ocho puntos cualquiera pertenecientes a la malla de 10 m de espaciado en la que se muestran los campos con los valores de altitud ortométrica a 1 metro sobre el suelo (campo Zmas1), la distancia geométrica a la catenaria (NEAR_DIST3) y el valor de la inducción magnética en ese punto (CM, en μT).

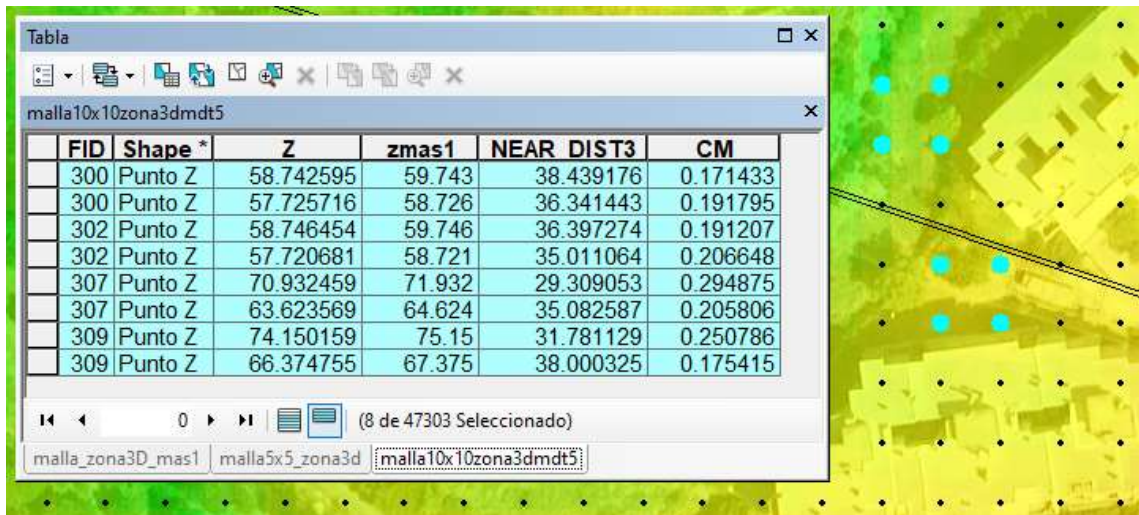


Figura 6. 5. Datos de altitud ortométrica, distancia geométrica e inducción magnética asociados a los puntos de una malla

- 8) Mediante una interpolación de distancia inversa ponderada (IDW) se generó a partir de cada malla una superficie de intensidad del campo magnético. Este método de interpolación proporciona buenos resultados cuando se dispone de una muestra abundante que tiene sus datos distribuidos de forma homogénea y sus localizaciones están próximas entre sí, como es el caso de los puntos que pertenecen a las mallas muestreadas. Por otra parte, este método también respeta los valores de entrada, por lo que se garantiza que el resultado no toma valores diferentes del rango de los datos muestreados. Comelli et al., (2007) aplicaron

también una interpolación IDW para validar en el rendimiento de un programa específico de cálculo del campo magnético el impacto de la orografía, y Azpurua & dos Ramos (2010) determinaron en un estudio comparativo de diferentes métodos de interpolación espacial para la predicción de valores del campo eléctrico, el IDW como el más adecuado.

En la Figura 6.6 se muestran compartiendo la misma extensión geográfica un extracto de los mapas de campo magnético generados. También se han categorizado con iguales rangos de valores de inducción magnética al objeto de que puedan compararse entre sí. En cualquiera de ellas tres, es posible observar el efecto del terreno sobre los valores del CM, principalmente en la falta de simetría de las isolíneas de CM a cada lado del eje de los vanos eléctricos, ya que el relieve no es homogéneo.

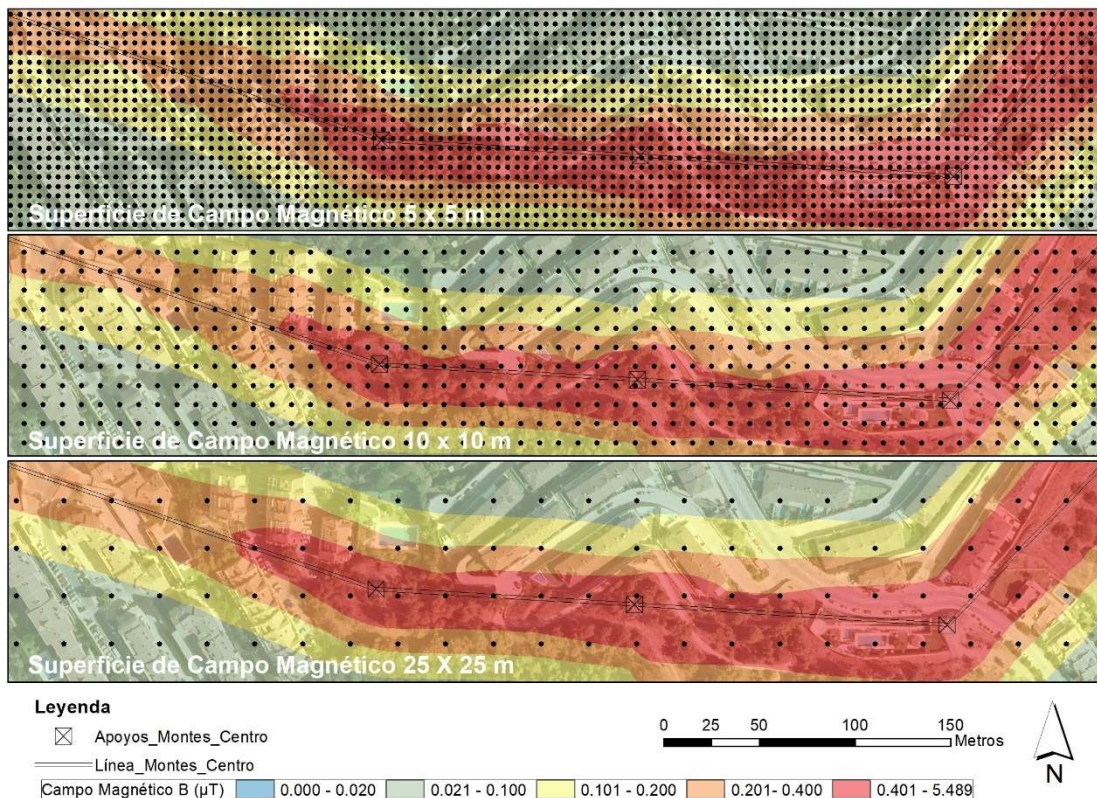


Figura 6. 6. Extracto de mapa de superficies de campo magnético generadas

También se pone de manifiesto la influencia de la precisión de los datos de elevación y los pasos de cada malla, que se evidencia a través de una mayor irregularidad de los contornos que delimitan los rangos de CM. La definición de cada zona clasificada, especialmente las de mayor valor de CM, es más detallada cuando se utiliza el paso de

malla más fino y el MDT de mayor precisión (en la imagen superior -Figura 6.6- Superficie de Campo Magnético 5 x 5 m).

Mediante una representación tridimensional de la superficie de CM (Figura 6.7) ajustada sobre su MDT de referencia se evidencia aún más la influencia del relieve del terreno y del pandeo de la línea en cualquier superficie generada.

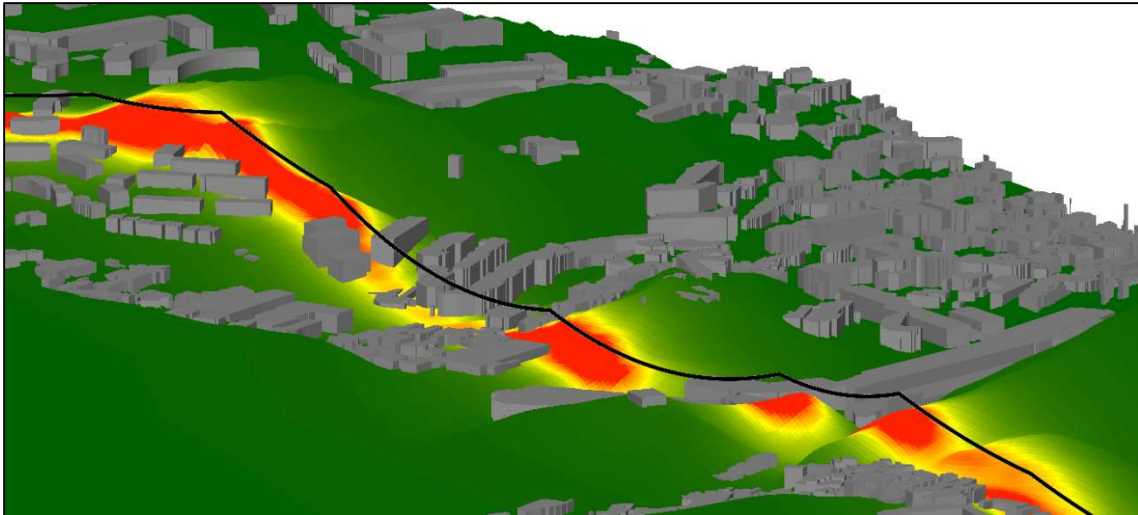


Figura 6. 7. Visualización 3D de la superficie de CM 5 x 5 m estimada a 1 m sobre el MDT05

Todos los pasos descritos para la obtención de las tres superficies de campo magnético se recogen en el siguiente diagrama de flujo de trabajo (Figura 6.8).

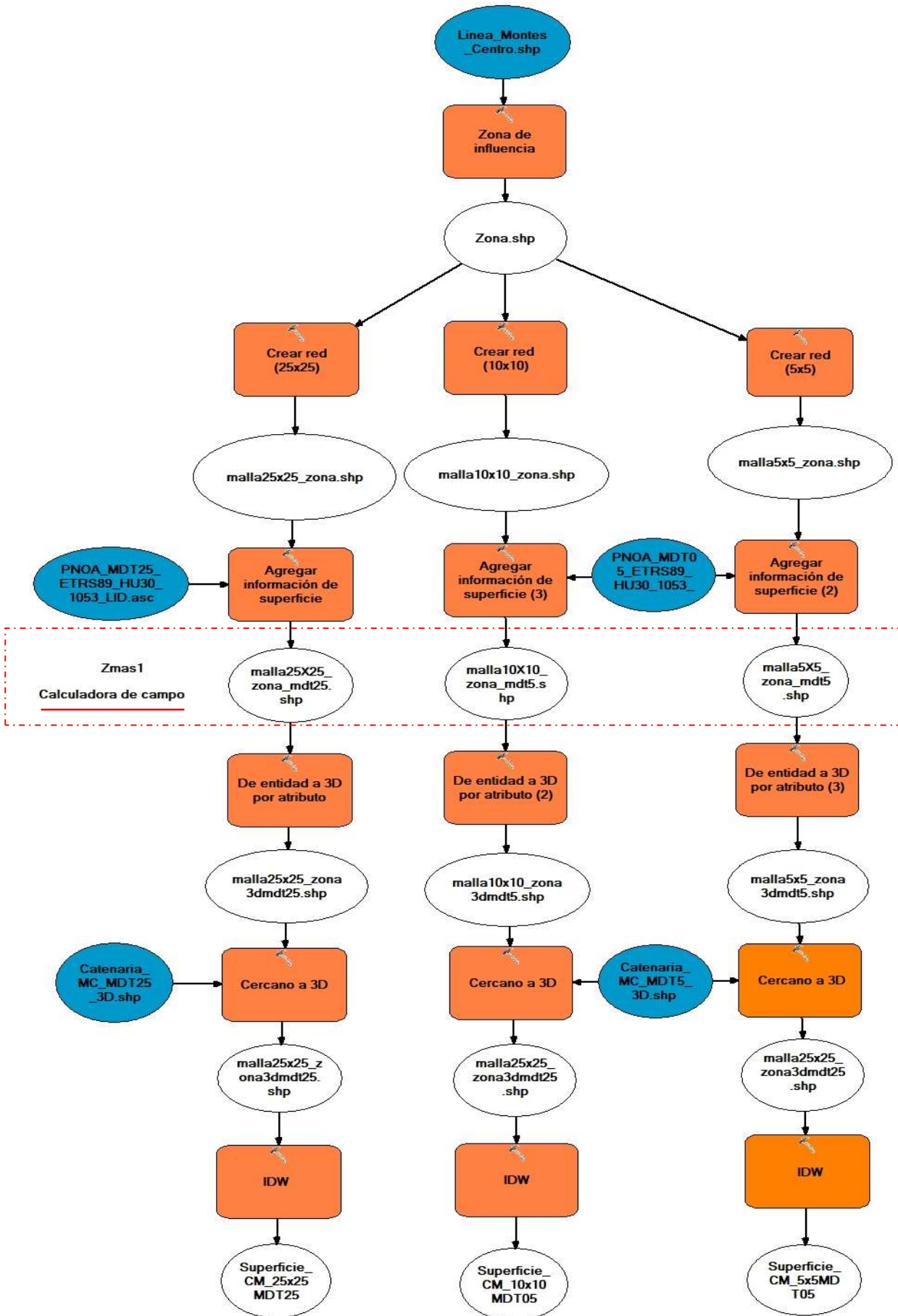


Figura 6.8. Flujo de trabajo para generar las superficies de campo magnético

6.2.5. Validación de la superficie de campo magnético

El objeto de la validación de las superficies de campos magnéticas generadas era determinar su precisión, entendiendo por esta el nivel de correspondencia entre un conjunto de datos simulados (modelados) y un conjunto de datos observados (medidos). Esta concordancia se definió mediante el coeficiente de regresión S , el coeficiente de determinación R^2 y la raíz del error medio cuadrático (RMSE). Así mismo, se realizó también un análisis de diferencias que además de completar los indicadores anteriores permitiera comparar entre sí la confiabilidad de las distintas superficies. La elección de los indicadores estadísticos más convenientes se basó en que la intensidad del campo magnético B decrece con la distancia a la línea, siendo más conveniente por este motivo la utilización de estadísticos no dependientes de la escala, como son el error medio relativo porcentual (por sus siglas en inglés, MRE) (27) y su desviación estándar (σ), así como el error medio absoluto porcentual (MAPE) (28):

$$\text{MRE} [\%] = \frac{100}{n} * \frac{B(\text{modelado}) - B(\text{medido})}{B(\text{medido})} \quad (27)$$

$$\text{MAPE} [\%] = \frac{100}{n} * \frac{|B(\text{modelado}) - B(\text{medido})|}{B(\text{medido})} \quad (28)$$

El primero de ellos proporcionaría información sobre el sentido global de la predicción, esto es, si la tendencia de las superficies es proporcionar valores de campo magnéticos que se sobreestiman o subestiman, mientras que el segundo, por tratar el valor absolutos de los datos, permitiría conocer el error promedio de las estimaciones.

A continuación, se detallan los procedimientos seguidos para la obtención de las muestras de valores medidos.

6.2.5.1. Procedimientos de medición de valores del campo magnético

La validación de las superficies de campos magnéticos se llevó a cabo mediante dos muestras de datos diferentes. Una se basó en los estándares vigentes sobre procedimientos normalizados de medidas de campos magnéticos de frecuencia industrial producidos por líneas eléctricas áreas de alta tensión (IEEE Std 644-1994, [IEEE, 1994]; UNE 215001:2004, [AENOR, 2004]), que plantean la toma de medidas de campo magnético

en perfiles transversales a la línea. La segunda muestra tuvo como objetivo conocer la capacidad de predicción del modelo en una zona residencial urbana consolidada, ya que una de las metas principales de este trabajo era proporcionar una metodología aplicable a estudios epidemiológicos. Estos estudios requieren conocer los valores de intensidad magnética en los domicilios correspondientes a los casos de la enfermedad, así como en los domicilios de control, por lo que para esta segunda muestra se definieron ubicaciones aleatorias a pie de calle.

A continuación, se describen con detalle la recogida de muestras en ambos contextos.

I. Muestreo basado en procedimientos normalizados

Según los estándares, la medida de la intensidad de campo magnético de una línea eléctrica debe llevarse a cabo mediante el registro de valores en ubicaciones dispuestas en un perfil longitudinal, definido al menos por cinco puntos equidistantes, y en un perfil transversal de ese mismo vano, que se recomienda que comprenda al menos cinco intervalos de cinco metros a cada lado del eje de la línea.

Para la línea estudiada, dado que transcurre por un barrio residencial, el replanteo de perfiles sólo fue posible en un tramo que atravesaba una zona no urbanizable limítrofe con la zona edificada. El vano correspondiente presenta un importante desnivel de 100 m, pero se pudo encontrar un tramo accesible de este en el que la pendiente de la línea era suave y constante. La separación más baja de los conductores respecto al suelo que se midió fue de 11 metros. No obstante, el replanteo del perfil transversal se vio limitado por el relieve del terreno, la presencia a un lado del eje de la línea de una hilera de viviendas unifamiliares y una densa vegetación. Por tanto, al objeto de disponer una muestra de medidas suficientemente representativa y en la que los posibles errores derivados del MDT se diluyeran lo máximo posible, se definieron ocho transectos laterales separados cinco metros entre sí. En cada transecto, se realizaron mediciones en puntos situados cada ± 2.5 m, ± 5 m, ± 7.5 m, ± 12.5 m, ± 17.5 m. Este alejamiento máximo estuvo limitado, como se ha comentado anteriormente, por las condiciones del terreno y la presencia de edificaciones cercanas, por lo que finalmente se obtuvieron un total de 69 puntos (Figura 6.9). En el Anexo II se recogen todos los valores registrados, siendo las

localizaciones que figuran sin datos aquellas a las que no se pudieron acceder. Únicamente cuatro de los ocho perfiles transversales (perfiles número 5, 6, 7 y 8) pudieron completarse a un lado del eje y que todos tuvieran el mismo número de puntos.

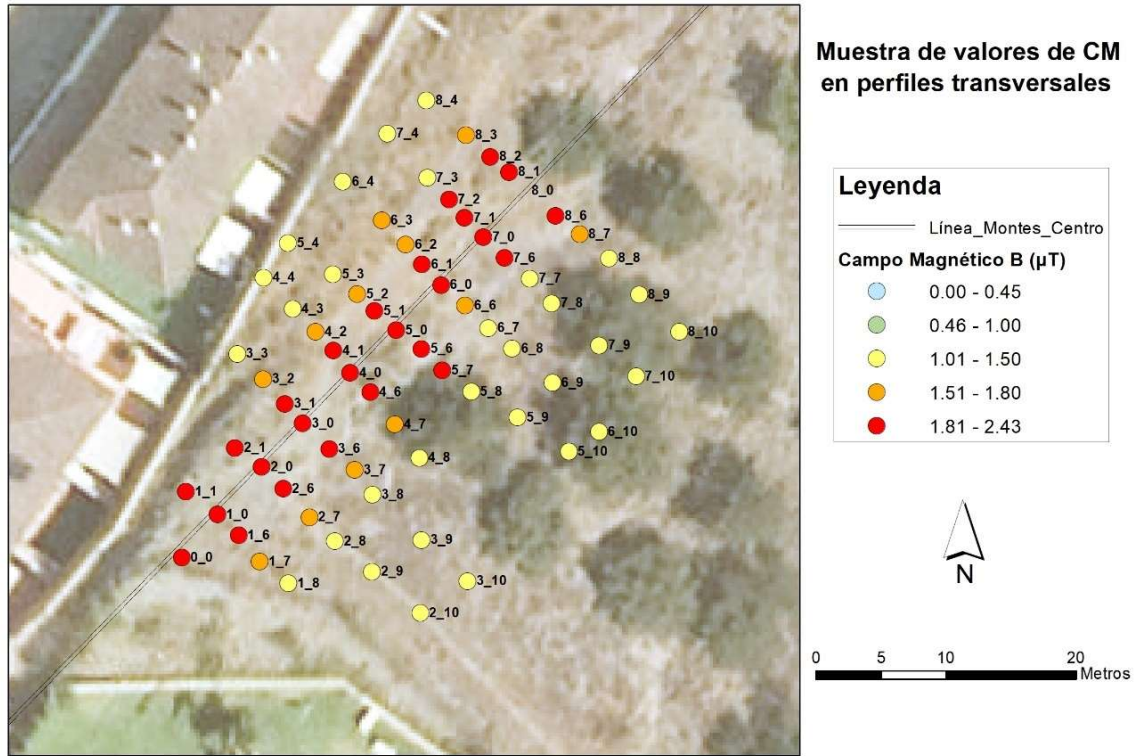


Figura 6.9. Muestra de valores de campo magnético medido distribuidos en perfiles transversales

En cada localización se registraron los valores de inducción magnética mediante un medidor de campo magnético triaxial PCE-G28 capaz de operar con un rango de frecuencia de 30 Hz a 300 Hz, con una resolución de 0.01 µT y una precisión de “±4% + 0.03 µT” en un rango de medición de 0.01 µT a 20 µT (PCE Instruments, 2014). Ubicando el dispositivo a 1 metro sobre el suelo, se tomaron cinco mediciones para cada eje (B_x , B_y , B_z) en cada punto y se anotó simultáneamente la hora exacta de la medición (ver Anexo II), así como la temperatura ambiente y la humedad. El campo magnético resultante (módulo) en cualquier ubicación vino dado por la expresión (29):

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \quad (29)$$

donde B_x , B_y y B_z son los valores cuadráticos medios (rms) de las tres componentes del campo ortogonal.

Las coordenadas geográficas de cada ubicación se tomaron mediante un receptor GPS (modelo Leica Viva GNSS GS15) que se volcaron a un fichero en formato “Excel”. Para crear una capa de puntos con estas localizaciones, en la hoja de cálculo se dejaron bien indicados los campos correspondientes a las coordenadas geográficas X, Y, para posteriormente, una vez cargado el fichero “Excel” en ArcMap, y sobre este escogiendo la opción “Visualizar datos XY” pudieran asumirse estas coordenadas como “Campo X”, “Campo Y”, asignándoles el mismo sistema de coordenadas que la cartografía base de referencia. Mediante una exportación de estos datos se generó la capa de puntos denominada “Perfil_CM”, y con una unión de tablas se le enlazó la correspondiente a los datos de CM muestreados, la cual había sido obtenida mediante la utilidad “Excel a tabla” a partir de una hoja de cálculo en formato Excel, la cual puede consultarse en el Anexo IV de esta tesis doctoral.

Este trabajo de muestreo fue llevado a cabo el jueves 11 de abril de 2019 entre las 8:00 y las 15:00 h y en él participaron la doctoranda junto con un profesor del Área de Expresión Gráfica en la Ingeniería y otros dos profesores del Departamento de Ingeniería Eléctrica, todos de la Universidad de Málaga. Un resumen de las medidas observadas se recoge en la Tabla 6.1, donde el valor máximo fue de 2.432 μT , en el punto del perfil 8 situado directamente bajo la línea, mientras que el valor más bajo fue de 0.453 μT medido a aproximadamente 17 m del eje de la línea en el perfil 2.

<i>Zona</i>	<i>N</i>	<i>Mínimo</i> (μT)	<i>Máximo</i> (μT)	<i>Media</i> (μT)
Libre Urbana	69	0.453	2.432	1.056

Tabla 6. 1. Resumen de resultados observados en la muestra distribuida en perfiles transversales

II. Muestreo de puntos aleatorios

La otra muestra estuvo formada por 28 puntos situados “a pie de calle”, ya que, aunque los estudios epidemiológicos estiman la exposición a CM en el interior de los domicilios, en este trabajo no era posible acceder a las viviendas. No obstante, se trató en la medida de lo posible que estas ubicaciones estuvieran próximas a las entradas de estas. Así

mismo, dado que en una zona urbana pueden existir otras fuentes de inducción magnética como pequeños centros transformadores, líneas subterráneas, etc. se procuró que cada punto de la muestra también se situara alejado de arquetas, armarios de distribución y otras instalaciones públicas. Otro requisito que se tuvo en cuenta para determinar las localizaciones fue evitar errores sistemáticos asociados al MDT y garantizar en la medida de lo posible la independencia espacial de los errores, para lo que estas localizaciones fueron distribuidas suficientemente alejadas entre sí y en calles con diferentes características tanto de altitud, como de tipología de edificaciones circundantes.

El procedimiento para registrar las medidas fue idéntico al realizado para el muestreo distribuido en perfiles transversales descrito en el apartado anterior, tomando nuevamente en cada punto cinco observaciones por eje de la sonda axial. El mapa correspondiente a las localizaciones muestreadas se observa en la Figura 6.10.

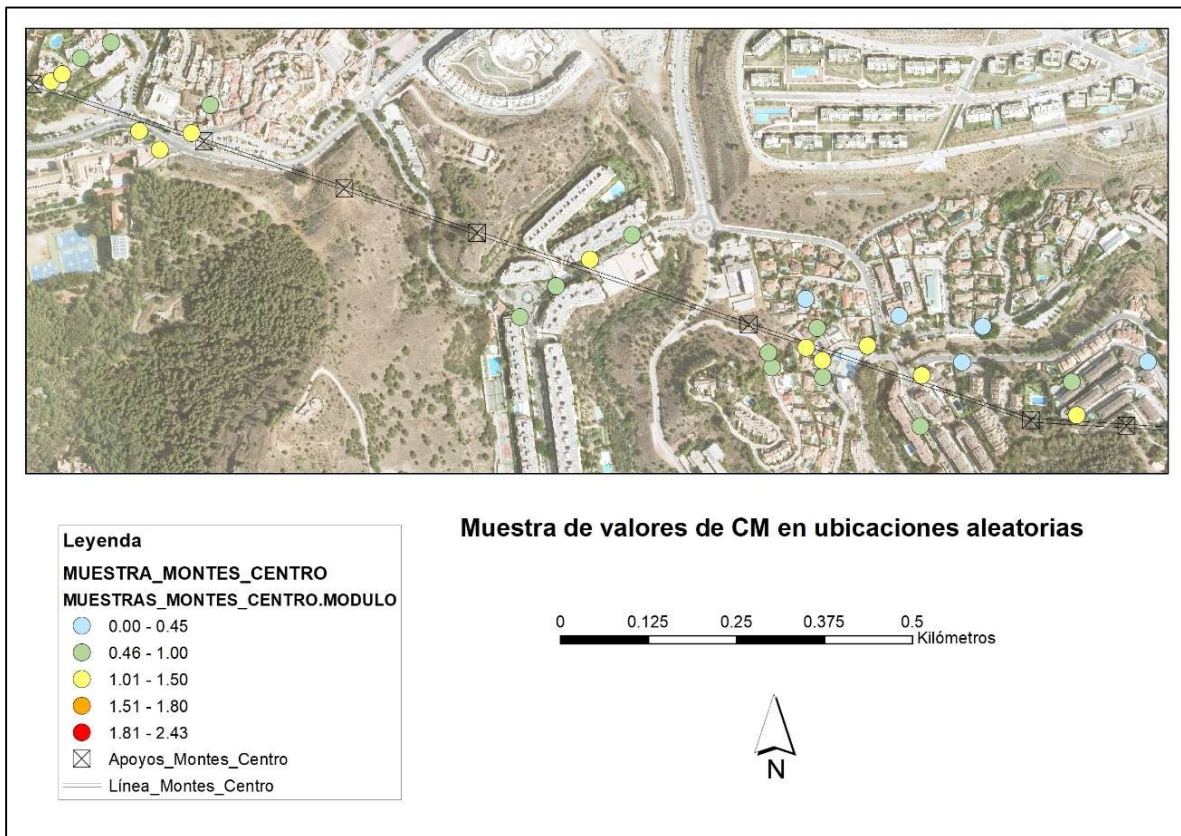


Figura 6.10. Muestra de valores de campo magnético medido distribuidos de forma aleatoria

Todas las ubicaciones también fueron georreferenciadas mediante el mismo receptor GPS y los valores del módulo del campo magnético calculados en una hoja de

cálculo Excel. También siguiendo el procedimiento descrito en el apartado anterior, se agregaron a la capa “Perfil_CM.shp” que contenía la primera muestra creando la capa “MUESTRA_MONTES_CENTRO.shp”. Este muestreo también se llevó a cabo el día 4 de noviembre de 2019 pero entre las 16:00 y las 20:00 horas.

Puede observarse en la Tabla 6.2 que los valores de inducción magnética que se registraron en esta zona fueron del orden de la mitad que los observados en la primera muestra, ya que estas localizaciones se encontraban generalmente más alejadas de la línea eléctrica, habiendo realizado observaciones hasta a 100 m de esta. Otro hecho que también originó estos valores más bajos fue que al situarse la segunda muestra en una zona urbana consolidada, la altura de los cables sobre el suelo era mayor que en la zona no peatonal.

<i>Zona</i>	<i>N</i>	<i>Mínimo</i> (μT)	<i>Máximo</i> (μT)	<i>Media</i> (μT)
Residencial Urbana	28	0.048	1.297	0.449

Tabla 6. 2. Resumen de resultados observados en zona libre y en la residencial

III. Asignación de valores de campo magnéticos simulados a los puntos de la muestra

Obtenidas las muestras, se asignó a cada localización el valor de la inducción magnética simulado derivándolo de cada superficie de campo magnético modelada, aplicando la herramienta “Extraer valores por puntos” sobre la capa “MUESTRA_MONTES_CENTRO.shp”. De esta manera, a cada localización se le atribuirían tres valores de CM, según se hubieran obtenido de las superficies basadas en las mallas de 5 x 5, 10 x 10 y 25 x 25 m. Este valor representaría la exposición a CM promedio durante el tramo horario en el que se realizó el muestreo correspondiente.

En la Figura 6.11 se muestra una captura de pantalla sobre la interfaz de ArcMap en la que se plasma un extracto de la tabla alfanumérica con todos los valores de inducción magnética asociados a cada punto: medidos (B_EJEX, B_EJE_Y, B_EJE_Z, MODULO) y simulados (CM_5x5MDT5, CM_10x10MDT5, CM_25x25MDT25). En el Anexo III

puede consultarse los diferentes valores del CM para la totalidad de los puntos muestreados.

GPS	DESCRIPCIO	B EJE X	B EJE Y	B EJE Z	MODULO	CM 5X5MDT5	CM 10X10MDT5	CM 25X25MDT25
92	8 8	0.784	0.258	1.102	1.376817	1.354545	1.399294	1.950579
93	8 7	1.196	0.046	1.156	1.663992	1.695732	1.695028	2.2507
94	8 6	2.058	0.108	0.82	2.217978	1.979457	1.936101	2.506151
95	8 0	2.428	0.086	0.12	2.432484	2.196083	2.229236	2.583826
96	8 1	2.042	0.19	0.938	2.255151	2.231276	2.256207	2.595885
97	8 2	1.026	0.236	1.594	1.91029	2.188425	2.066386	2.574327
98	8 3	0.54	0.238	1.554	1.662276	1.899061	1.80949	2.320962
99	8 4	0.098	0.114	0.978	0.989487	1.340408	1.369808	1.888052
102	Aleatorio	0.062	0.03	0.01	0.069599	0.043138	0.043291	0.045415
103	Aleatorio	0.046	0.008	0.01	0.047749	0.050852	0.051085	0.054586
104	Aleatorio	0.042	0.06	0.008	0.073675	0.062619	0.062983	0.067157
105	Aleatorio	0.014	0.01	0.06	0.062418	0.080263	0.081287	0.093834
106	Aleatorio	0.146	0.14	0.1	0.177516	0.226048	0.225864	0.258724
107	Aleatorio	0.19	0.036	0.024	0.194864	0.277706	0.272676	0.299126
108	Aleatorio	0.07	0.016	0.122	0.141563	0.192944	0.193025	0.219587
109	Aleatorio	0.254	0.016	0.034	0.256764	0.354666	0.344344	0.490892

Figura 6. 11. Extracto de la tabla alfanumérica correspondiente a la muestra de valores de campo magnético

6.3. Resultados

En este apartado se analizará el desempeño de las superficies modeladas mediante análisis de regresión donde la variable objetivo vendrá dada por los valores de campo magnético medidos, y mediante análisis de diferencias entre los valores observados y simulados.

En todos los casos cabe destacar que, todos los valores medidos estuvieron muy por debajo de los límites máximos de exposición recomendados por la Unión Europea (European Commission COM, 2008).

6.3.1. Análisis de regresión lineal

Una primera información sobre la capacidad de simulación del modelo de superficie de campo magnético propuesto se obtuvo a partir de los análisis de regresión lineal entre los valores predichos por las superficies modeladas y los valores medidos.

En la zona libre urbana, donde la validación se llevó a cabo mediante muestras distribuidas en perfiles transversales, la superficie de CM generada a partir de la malla de 5 x 5 m obtuvo un ajuste excelente con un coeficiente de determinación $R^2= 0.922$ (ver Tabla 6.3). La intercepción indicó que si la inducción magnética real fuera nula ($0 \mu T$), se sobrestimaría este valor en $0.2 \mu T$, si bien el coeficiente de regresión (S) mostró que, de forma general, esta superficie predecía un incremento de $1.09 \mu T$ para cada unidad de

μT observado y que con un 95% de confianza, este incremento oscilará entre 1.019 y 1.175 μT .

<i>Estadísticas de la regresión</i>						
<i>Coefficiente de correlación múltiple</i>		0.960279129				
<i>Coefficiente de determinación R²</i>		0.922136006				
<i>R² ajustado</i>		0.920973857				
<i>Error típico</i>		0.140691064				
<i>Observaciones</i>		69				
<i>ANÁLISIS DE VARIANZA</i>						
	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>	
<i>Regresión</i>	1	15.70601962	15.70601962	793.4747437	7.31364E-39	
<i>Residuos</i>	67	1.326196357	0.019793975			
<i>Total</i>	68	17.03221597				
	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
<i>Intercepción</i>	-0.204544131	0.06305171	-3.244069515	0.001839511	-0.330395871	-0.078692391
<i>Variable X 1</i>	1.097440128	0.038959581	28.16868374	7.31364E-39	1.019676478	1.175203778

Tabla 6. 3. *Análisis de regresión lineal de la muestra en perfiles para la superficie de CM 5 x 5 m MDT05*

Los valores predichos por la superficie de CM basada en la malla de 10 x 10 m tuvieron un ajuste algo inferior a los valores medidos, con un R² de 0.898 y un cambio medio de los valores estimados ligeramente más incrementado, con S = 1.233 (Tabla 6.4).

También se observó un incremento de la incertidumbre en la predicción de valores, encontrándose el cambio entre 1.133 μT y 1.334 μT con una confianza del 95%.

<i>Estadísticas de la regresión</i>						
<i>Coefficiente de correlación múltiple</i>		0.948225248				
<i>Coefficiente de determinación R²</i>		0.899131122				
<i>R² ajustado</i>		0.897625616				
<i>Error típico</i>		0.1601315				
<i>Observaciones</i>		69				
<i>ANÁLISIS DE VARIANZA</i>						
	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>	
<i>Regresión</i>	1	15.31419545	15.31419545	597.2286614	4.32049E-35	
<i>Residuos</i>	67	1.71802052	0.025642097			
<i>Total</i>	68	17.03221597				
	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
<i>Intercepción</i>	-0.361737725	0.078830844	-4.588784101	2.01245E-05	-0.519084749	-0.204390701
<i>Variable X 1</i>	1.23356214	0.050476672	24.43826224	4.32049E-35	1.132810282	1.334313999

Tabla 6. 4. *Análisis de regresión lineal de la muestra en perfiles para la superficie de CM 10 x 10 m MDT05*

Sin embargo, al trabajar con datos del terreno de 25 m de resolución, el ajuste resultó bastante escaso (Tabla 6.5), con un $R^2 = 0.275$. También el coeficiente de regresión se quedó alejado de su valor óptimo con un 0.53, indicando que los valores simulados con esta superficie se encontraban muy alejados de los valores observados.

<i>Estadísticas de la regresión</i>						
<i>Coefficiente de correlación múltiple</i>		0.524796255				
<i>Coefficiente de determinación R²</i>		0.27541111				
<i>R² ajustado</i>		0.26459635				
<i>Error típico</i>		0.429184483				
<i>Observaciones</i>		69				
<i>ANÁLISIS DE VARIANZA</i>						
	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>	
<i>Regresión</i>	1	4.690861499	4.690861499	25.46622585	3.67376E-06	
<i>Residuos</i>	67	12.34135447	0.184199321			
<i>Total</i>	68	17.03221597				

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
<i>Intercepción</i>	0.580384207	0.190608521	3.044901681	0.003325419	0.199928006	0.960840409
<i>Variable X 1</i>	0.534139359	0.105845473	5.046407222	3.67376E-06	0.322870911	0.745407807

Tabla 6. 5. *Análisis de regresión lineal de la muestra en perfiles para la superficie de CM 25 x 25 m MDT25*

El análisis de regresión realizado para las tres superficies en esta zona de validación obtuvo p-valores muy inferiores a 0.05 para todos los coeficientes, por lo que estos fueron estadísticamente significativos. Cuando los análisis de regresión se aplicaron sobre la muestra de ubicaciones aleatorias tomada en la zona urbana (Tabla 6.6), las superficies basadas en los MDT de 5 x 5 m de resolución volvieron a obtener buenas correlaciones con los datos medidos. Concretamente, cuando la superficie de CM se modeló a partir de la malla de 5 x 5 m, el porcentaje de variabilidad de los valores simulados estuvo en un 94.97%. No obstante, el coeficiente de intercepción tuvo una probabilidad muy alta de ser nulo, siendo estadísticamente no significativo. Esta falta de significancia de este coeficiente no se dio en los demás coeficientes del análisis de regresión, lo que se traduce en que el modelo puede aplicarse para predecir datos, siempre que se asuma que el intercepción será cero, o lo que es lo mismo, que, para un valor real nulo del campo magnético, el valor simulado necesariamente también lo será. Esta circunstancia sobre el valor de correspondencia para valores nulos del CM, que aparentemente representa la situación ideal, no se dio porque la intercepción hubiera sido realmente cero de forma significativa.

Por tanto, aunque las consecuencias de la falta de significancia del coeficiente de regresión sean asumibles, debe interpretarse el análisis de regresión en su conjunto, que no muestra la misma solidez obtenida que los análisis de regresión realizados de la muestra en perfiles transversales. Esta misma interpretación del análisis de regresión fue aplicable para todas las superficies modeladas en la zona urbana.

<i>Estadísticas de la regresión</i>						
<i>Coficiente de correlación múltiple</i>	0.974519441					
<i>Coficiente de determinación R²</i>	0.94968814					
<i>R² ajustado</i>	0.947753068					
<i>Error típico</i>	0.084464588					
<i>Observaciones</i>	28					
<i>ANÁLISIS DE VARIANZA</i>						
	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>	
<i>Regresión</i>	1	3.501332265	3.501332265	490.7767594	2.1008E-18	
<i>Residuos</i>	26	0.185490933	0.007134267			
<i>Total</i>	27	3.686823198				
	<i>Coficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
<i>Intercepción</i>	-0.030065936	0.026883525	-1.118377744	0.273632795	-0.085325814	0.025193941
<i>Variable X 1</i>	0.968037754	0.043696867	22.15348188	2.1008E-18	0.878217557	1.057857951

Tabla 6. 6. *Análisis de regresión lineal de la muestra aleatoria para la superficie de CM 5 x 5 m MDT05*

La malla de 10 x 10 volvió a mostrar en esta zona, un ajuste también óptimo con coeficientes de determinación y de regresión muy próximos a la unidad y estadísticamente significativos. Si se asume la intercepción igual a cero, correspondería para una unidad de inducción magnética un incremento del valor simulado de $0.996 \mu\text{T} \pm 0.109 \mu\text{T}$ (tabla 6.7).

<i>Estadísticas de la regresión</i>						
<i>Coficiente de correlación múltiple</i>	0.965258161					
<i>Coficiente de determinación R²</i>	0.931723317					
<i>R² ajustado</i>	0.92909729					
<i>Error típico</i>	0.098395603					
<i>Observaciones</i>	28					
<i>ANÁLISIS DE VARIANZA</i>						
	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>	
<i>Regresión</i>	1	3.435099138	3.435099138	354.8034999	1.12214E-16	
<i>Residuos</i>	26	0.25172406	0.009681695			
<i>Total</i>	27	3.686823198				

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
<i>Intercepción</i>	-0.038480722	0.031874141	-1.207270893	0.238196546	-0.103998956	0.027037512
<i>Variable X 1</i>	0.995812247	0.052866686	18.83622839	1.12214E-16	0.88714286	1.104481633

Tabla 6.7. *Análisis de regresión lineal de la muestra aleatoria para la superficie de CM 10 x 10 m MDT05*

Se observa que también el ajuste es notorio incluso para la malla de 25 x 25, con un coeficiente $R^2 = 0.842$ y un cambio medio óptimo con $S = 0.899$ (Tabla 6.8).

<i>Estadísticas de la regresión</i>						
<i>Coefficiente de correlación múltiple</i>		0.917633892				
<i>Coefficiente de determinación R^2</i>		0.84205196				
<i>R^2 ajustado</i>		0.835977036				
<i>Error típico</i>		0.149656851				
<i>Observaciones</i>		28				
<i>ANÁLISIS DE VARIANZA</i>						
	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>	
<i>Regresión</i>	1	3.104496701	3.104496701	138.6110964	6.38893E-12	
<i>Residuos</i>	26	0.582326497	0.022397173			
<i>Total</i>	27	3.686823198				
	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
<i>Intercepción</i>	-0.05378881	0.05123256	-1.049895026	0.303427765	-0.159098847	0.051521226
<i>Variable X 1</i>	0.898755632	0.076338325	11.77332138	6.38893E-12	0.741839958	1.055671306

Tabla 6.8. *Análisis de regresión lineal de la muestra aleatoria para la superficie de CM 25 x 25 m MDT25*

Al objeto de obtener una mayor información sobre el desempeño del modelo propuesto se generaron también los diagramas de dispersión de cada superficie de CM en cada zona de validación (Figura 6.12).

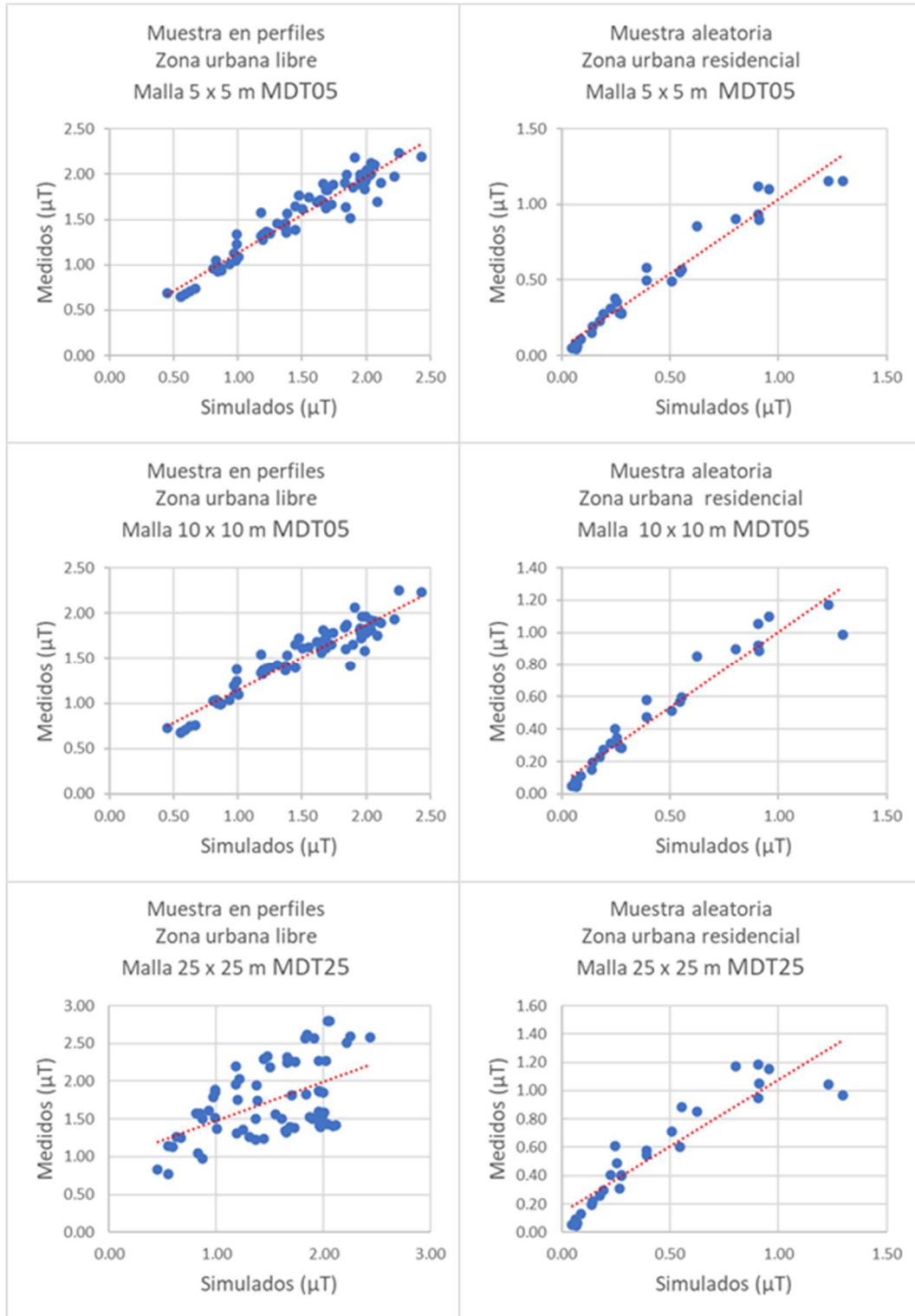


Figura 6. 12. Gráficas de dispersión de las superficies de CM generadas a partir de las diferentes mallas en cada zona

En ellos se puede observar como el ajuste de los valores modelados a los valores reales tiende a mejorar cuanto más pequeños son estos, y que este efecto tiene lugar tanto en la zona urbana libre como en la zona urbana residencial. También se observa como esta ganancia es menos acusada en esta última zona conforme las superficies de CM se derivan de mallas más gruesas

6.3.2. Análisis de diferencias entre valores medidos y simulados

Es importante destacar que, aunque tanto los diagramas de dispersión como el análisis de regresión lineal mostraron mejores ajustes de los modelos en la zona urbana residencial, la capacidad de predicción de cualquiera de las superficies en la zona libre urbana fue más adecuado. Dado que el coeficiente de determinación R^2 es un mero indicador del grado de ajuste entre valores predichos y medidos, por sí solo no refleja necesariamente si los datos simulados reproducen fielmente a los datos observados. Este coeficiente tiene la capacidad de indicar la precisión de la predicción, pero no refleja de forma consistente su exactitud (Willmott, 1982).

Los resultados del análisis de diferencias resumidos en la Tabla 6.9 junto a los resultados del análisis de regresión, muestran como en la zona urbana libre los errores medios porcentuales (MAPE) resultaron muy inferiores a los obtenidos en la zona urbana residencial, llegando a duplicarse dentro de cada superficie a pesar de que las simulaciones estuvieran más ajustadas. Las diferencias obtenidas fueron prácticamente idénticas cuando las superficies se modelaron a partir del MDT05, obteniendo un MAPE de 9.65% y 19.51% para la malla de 5 x 5, y de 10.71% y 20.54% para la malla de 10 x 10, en las zonas libres y residencial respectivamente. La variación del error porcentual entre zonas resultó algo menos acusado para la malla de 25 x 25, obteniendo un 36.61% y un 41.45 %. Este efecto, así como el que se observa en una mayor homogeneidad de los valores de la raíz del error cuadrático medio (RMSE) de las distintas superficies en la zona residencial urbana, que no se da en la otra zona de validación, puede ser debido a que los valores extremos se disuelven más rápido en resoluciones más gruesas. El incremento de error en las distancias entre el suelo y la línea eléctrica aérea, y por ende en los valores de inducción magnética, es más sensible al pasar de un MDT de mejor a peor resolución en la zona despejada de edificios. En la zona más urbanizada, los errores de cualquier MDT de partida serán mayores y estos errores, al bajar la resolución del

MDT (y, por tanto, su exactitud), se empeoran, pero de manera menos acusada que en la zona libre urbana, y los errores atípicos se disuelven más rápido al pasar a mallas más gruesa, y por eso es posible explicar esa homogeneidad (Pontius et al., 2008).

<i>Zona</i>	<i>Modelo</i>	<i>MRE</i> (%)	σ (%)	<i>MAPE</i> (%)	<i>RMSE</i> (μT)	<i>R</i> ²	<i>S</i>
Libre Urbana (Perfiles Transversales) N=69	Paso de malla 5x5 MDT5	6.26	11.77	9.65	0.154	0.922	1.097
	Paso de malla 10x10 MDT5	3.71	14.22	10.71	0.181	0.889	1.233
	Paso de malla 25x25 MDT25	24.88	40.46	36.61	0.531	0.275	0.534
Residencial Urbana (Ubicaciones aleatorias) N=28	Paso malla 5x5 MDT5	14.01	21.4	19.51	0.094	0.949	0.968
	Paso de malla 10x10 MDT5	14.02	21.9	20.24	0.103	0.931	0.995
	Paso de malla 25x25 MDT25	35.42	36.6	41.45	0.185	0.842	0.898

Tabla 6. 9. Resumen de los análisis estadísticos de diferencias y de regresión lineal para la validación del modelo

Para todos los modelados y en ambas zonas, se obtuvieron errores medios relativos positivos, lo que indicaron un tendencia general a realizar predicciones de los valores del CM al alza, si bien con mayores diferencias y dispersiones en la zona residencial. Esta sobreestimación coincide con la mostrada por los coeficientes de determinación obtenidos que se encuentran todos por debajo de la identidad. Esta sobrestimación también puede observarse con más detalle en las gráficas comparativas de los valores medidos y simulados para cuatro perfiles transversales con idéntico número de puntos (Figura 6.13), siendo la superficie de campo magnético generada a partir del

MDT25 la que generó una mayor sobrestimación, mientras que las obtenidas con el MDT05 mostraron curvas muy similares y ajustadas a la real y de forma especial, a partir de los 17.5 metros a la línea.

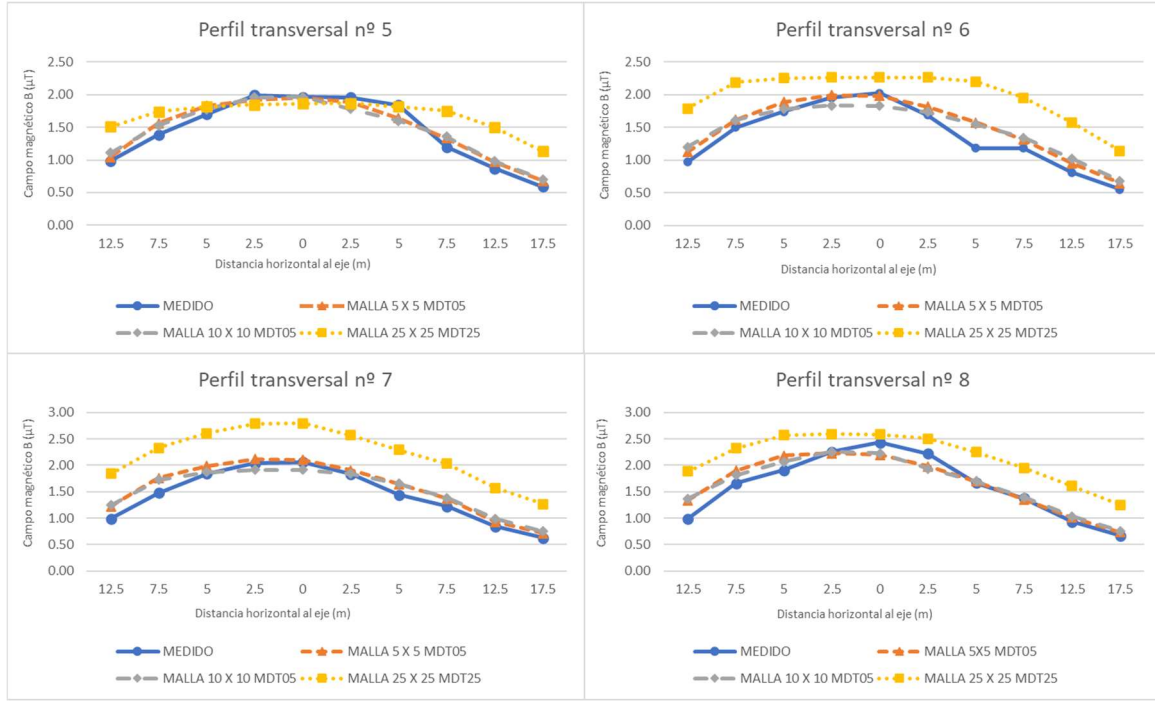


Figura 6. 13. Gráficas comparativas de los valores de campo magnético medidos y modelados en perfiles transversales a la línea

Los cambios abruptos que muestra la curva correspondiente a los valores medidos no pueden atribuirse a variaciones de la intensidad de corriente circulante y en cambio ponen de manifiesto la irregularidad del terreno. La intensidad circulante por los cables, según los datos proporcionados por la empresa gestora, fue prácticamente constante durante el periodo de medición, en cambio, si existieron incrementos significativos de la distancia, ya que al no ser el terreno plano ni con una pendiente constante, determinó distancias superiores a los espaciados de 2.5 y 5 m preestablecidos. Estos desniveles del suelo, al quedar suavizados en los modelos digitales del terreno, dieron lugar a que los valores simulados generaran curvas más parabólicas.

6.4. Discusión

La validación del modelo de simulación propuesto demostró que es posible simular una superficie de intensidad del campo magnético generado por LEAAT en una zona urbana compleja con una exactitud confiable, y que puede realizarse de forma íntegra aplicando

las herramientas de análisis espacial tridimensional integradas en un Sistema de Información Geográfica y una hoja de cálculo, sin necesidad de recurrir a otros programas informáticos específicos de cálculo de CM.

El modelo propuesto permite obtener valores del campo magnético en localizaciones puntuales, cubriendo así la necesidad básica de los estudios epidemiológicos de exposición residencial a CM, que necesitan realizar estimaciones en los domicilios de casos de estudio y control. De esta forma, se proporciona una herramienta especialmente útil para caracterizar la exposición residencial en base a la geometría de los domicilios, pudiendo conceptualizar esta exposición como el valor de la intensidad magnética en el punto de acceso a este según el promedio de los puntos más alejados y cercanos de la vivienda a la línea eléctrica, o como el centroide del polígono que identifica la casa, siendo estas algunas de las consideraciones habituales en la literatura.

No obstante, la principal aportación respecto a otras metodologías desarrolladas por otros autores para el cálculo del CM en el ámbito residencial consiste en que estos valores puntuales de intensidad del CM son obtenidos a partir de una superficie representativa de esta variable continua, generada previamente. Esta superficie abarca un entorno suficientemente extenso a ambos lados de la línea eléctrica como para que los valores de CM caigan a valores de ambiente o no se encuentren determinados por estas líneas eléctricas.

Además, tiene la capacidad de representar la inducción magnética no sólo a 1 metro sobre la cota real del suelo, sino que es posible aplicar la misma metodología para generar las superficies de CM correspondientes a cualquier altitud ortométrica de interés. De esta forma, se proporciona una herramienta no sólo aplicable a estudios epidemiológicos, sino que permitiría investigar la posible afectación de los CM a cualquier ecosistema, como la vegetación en el entorno de la línea o la avifauna anidada en la arboleda próxima a ella.

Los resultados en forma de una superficie continua de valores de inducción magnética no sólo resultan esenciales para poder combinarlos en un análisis multicriterio con otros mapas de contaminantes ambientales u otros factores de naturaleza también

especialmente continua, sino que permitiría abordar incluso la incertidumbre en las estimaciones de exposición a CM debida a la movilidad de los individuos examinados, ofreciendo una alternativa a la cuantificación de la exposición de las personas a CM sin necesidad de portar dosímetros individuales que tampoco reflejan realmente exposiciones a largo plazo. Todo ello supone una contribución al desarrollo del mapeo de la exposición a CM FEB, desatendida en este campo de investigación (Kokate et al., 2016).

El modelo propuesto también tiene algunas limitaciones. Las primeras son inherentes al método de cálculo de la intensidad del CM aplicado, que si bien presenta la fortaleza de que permite obtener estos valores mediante un procedimiento analítico sencillo, se encuentra sujeto a la disponibilidad de diversos parámetros geométricos y de funcionamiento de la línea eléctrica. Por ejemplo, el desconocimiento o una suposición errónea de las configuraciones de las fases puede repercutir en los valores de inducción magnética calculados hasta con un factor de 5, dependiendo de configuración asumida como válida (Bürgi et al., 2017). Si tampoco se conocen la altura libre de los apoyos o la tensión mecánica de los cables, no podría realizarse el modelado tridimensional de la línea eléctrica, y obtener estos datos a partir de mediciones in situ conlleva una carga de recursos y tiempo que no siempre resulta factible. Aunque es habitual en estudios a gran escala asumir valores geométricos promedios de las líneas, esto puede afectar a la validez de los resultados.

Sería necesario generar, según la metodología propuesta en esta tesis, un modelado con valores comunes de líneas eléctricas y validarlo, al objeto de conocer su desempeño cuando se dan estas limitaciones. De la misma manera, también sería interesante investigar la precisión de este modelo cuando se requiera considerar datos de carga históricos de la línea, ya que las superficies que se han propuesto representan para la zona estudiada el valor promedio de la intensidad de campo magnético en una franja temporal de mañana o tarde de un día concreto. En el caso de que no sea posible disponer de ningún dato referente a la carga de la línea, el modelo presenta la capacidad de trabajar con la distancia como un sustituto de la exposición residencial a CM, y aporta como una diferencia sustancial a los métodos basados en esta distancia, la introducción de la distancia geométrica como un posible predictor más preciso que la mera distancia horizontal.

Por otra parte, este método de cálculo no sería adecuado en caso de trazados complejos de líneas eléctricas, como la existencia de dos líneas paralela o cruces de varias líneas, en cuyo caso sería necesario recurrir a métodos de cálculo más sofisticados (Modrić, et al., 2015a). No obstante, en estudios en los que se abarquen una longitud de red eléctrica a gran escala donde pueden darse estas situaciones con cierta frecuencia, si se tiene integrada en un SIG la cartografía de la red es posible realizar análisis espaciales que identifiquen estos tramos conflictivos. De esta manera se simplificarían los trabajos pudiendo decidir en qué vanos se aplica un método de cálculo u otro, optimizándolo en base a las características urbanas y de la línea en cada zona.

También debe tenerse en cuenta que la expansión en serie de la ley de Biot-Savart aplicada a conductores rectilíneos indefinidos, incluso cuando tiene en cuenta la altura variable de los cables según la catenaria que describen, así como el relieve del terreno, sólo es válida a distancias muy grandes en comparación con la distancia de separación entre las fases. Por lo tanto, este modelo no podría aplicarse para estudiar el impacto del CM en especies que habitan de forma estrecha junto a los conductores, como los nidos de aves de las torres eléctricas.

Otras limitaciones de trabajar con un modelo tridimensional vienen impuestas por la calidad de los datos a partir de los cuales se derivan las alturas ortométricas. Las superficies que se obtuvieron sólo fueron representativas cuando las elevaciones se derivaron de un MDT de alta precisión y de 5 x 5 m de resolución. Idénticas conclusiones se obtuvieron en un estudio sobre el modelado de la exposición a CM generados por LEAAT a largo plazo, realizado en Suiza (Bürgi et al., 2017), en el que obtuvieron resultados también significativamente más precisos al utilizar un MDT de 5 x 5 m que con un MDT de 25 x 25 m, que utilizaron para derivar las cotas de los apoyos eléctricos. Este requisito de partir de datos de elevación de alta precisión cobra especial importancia cuando se trabaja en una zona urbana, lo que se puso de manifiesto la investigación aquí presentada. El error relativo medio en términos absolutos se duplicó de un 10% a un 20% al pasar de una zona con escasas edificaciones a una con una urbanística variada y consolidada, lo cual se atribuyó de forma principal a la capacidad de modelado del MDT en cada zona, ya que los valores de carga de la línea resultaron bastante homogéneos dentro de cada periodo de medición, no existiendo valores picos que pudieran dar lugar a

valores medidos alejados del promedio. En cambio, la obtención de MDT a partir de datos LIDAR resulta una tarea especialmente compleja en entornos urbanos debido a la elevada diversidad de elementos constructivos como muros cortos, edificios de diferentes alturas y cubiertas variadas (Chen et al., 2017), así como a las características altamente heterogéneas de su superficie, debido a la presencia de vehículos, árboles, mobiliario urbano, cables, etc. (Meng et al., 2010b) lo que puede repercutir en la calidad de los MDT y por ende, en los productos derivados de los mismos.

Otra posible justificación del descenso en la representatividad de las superficies según la zona de validación fue la posible incidencia de elementos perturbadores del CM que no pudieran ser identificados, lo que es más habitual que ocurra en un entorno urbanizado.

Si bien la resolución del MDT fue clave en la repercusión de la calidad de las superficies de CM modeladas, la influencia del paso de malla a partir del cual fueron obtenidas no generó diferencias significativas entre ellas, obteniendo resultados similares al utilizar una de 5 x 5 m o una de 10 x 10 m. Sin embargo, el número de puntos a procesar difirió enormemente, pasando de 189165 puntos a 470303 puntos, respectivamente, para 1000 m a cada lado de 2.5 km de línea eléctrica. A mayor densidad de la malla se requiere un mayor tiempo del procesado de la interpolación, lo que puede condicionar trabajos en los que se modelen extensiones territoriales significativas. Además, el programa ArcGIS utilizado establece un límite de aproximadamente 45 millones de puntos de entrada en una interpolación por el método de IDW, si bien resulta posible superar este número mediante una división del área de estudio siempre que se garantice la superposición entre los bordes de las diferentes partes, que podrían integrarse como un mosaico en un “dataset” ráster de gran tamaño (ESRI, 2016). De esta manera, serían suficiente 5 “datasets” para poder obtener una capa ráster de intensidad magnética correspondiente a 10000 km de línea, por lo que parece factible que el modelo propuesto pueda aplicarse en grandes estudios epidemiológicos.

Swanson, (2008) consideró en un destacable estudio epidemiológico llevado a cabo en Reino Unido 7000 km de línea, y Bessou et al., (2013) necesitaron abordar en otro estudio desarrollado en toda Francia 81000 km. No obstante, para el modelo aquí propuesto los tiempos de procesado que fueron necesarios para la ejecución de las

diversas operaciones espaciales, tanto de extrapolación de alturas ortométricas del MDT, análisis de proximidad como de interpolación de las mallas, apenas consumieron pocos minutos con una unidad de escritorio Intel i5-7200U. Otros autores (Joseph et al., 2018) que aplicaron una metodología de modelado de superficies de CM similar aunque sin considerar la elevación del terreno invirtieron 14 horas para la interpolación de una rejilla de 10 x 10 m para la región de Flandes (Bélgica), con un procesador Intel i-4770 utilizando el programa informático QSIG, de prestaciones parecidas al programa ArcGIS. Una solución para optimizar los consumos de tiempo sería definir mallas únicamente en el entorno de las localizaciones de casos de estudios y control de los estudios epidemiológicos, reduciendo así notablemente el número de puntos a procesar.

A pesar de las limitaciones expuestas, este trabajo proporcionó una herramienta válida para el cálculo del CM en un entorno urbano, con una confiabilidad similar a la obtenida por otros investigadores que han aplicado otras metodologías que conllevaban trabajos de campo importantes. Aunque el enfoque temporal y el método de validación no permitan realizar comparaciones estrictas con estas, resulta de interés mencionar que Bürgi et al., (2017) obtuvieron desviaciones de los valores calculados frente a los medidos de $\pm 1-2\% \pm 8$, y Swanson, (2008) de $\pm 7\% \pm 1\eta T$, si bien en ambos casos el procedimiento de validación se llevó a cabo en un único perfil transversal a un vano eléctrico replanteado en una zona en campo abierto sin ninguna edificación. Otros autores (Vergara et al., 2015) al comparar los valores de campo calculados con los obtenidos a las visitas al sitio obtuvieron un coeficiente de Pearson de 0.78 mejorado a 0.90 al excluir algunas mediciones cuestionables. El acuerdo obtenido con este modelo basado en un SIG tridimensional fue algo mejor, incluso podría decirse que la representatividad de la muestra también era mayor, pues a pesar de incluir solo 28 puntos, los otros autores consideraron 118 para todo el estado de California.

La comparación de los resultados con otros estudios también resulta compleja, tanto por la diversidad de caracterizaciones de la exposición residencial a CM, como por la diversidad de metodologías para calcularla dentro de cada una de ellas. Además, tampoco existe una falta de consenso acerca de cómo evaluar la representatividad de los modelos que se proponen y que permita compararlos de forma más estrecha. Sería recomendable desarrollar en este sentido unas directrices sobre el procedimiento de

validación de estos modelos. Este procedimiento debería requerir y especificar diferentes zonas de validación, y de forma especial, aquella que es objeto de estudio. También debería diferenciar subzonas dentro de la misma según tipologías de líneas eléctricas, configuración urbanística, relieve del terreno, etc. Así mismo, debería establecer los tamaños de la muestra en cada caso, y también particularizarlas en función de la distancia a la línea y/o valores de intensidad del CM. Otra regulación muy importante que debería aportar sería la inclusión de descripciones detalladas en base a un decálogo de la forma en que los diferentes parámetros que intervienen en el cálculo del CM, ya que esta no siempre se recoge de una manera explícita y clara, por ejemplo, la manera en cómo se ha considerado la orografía o el pandeo de la línea.

Tampoco existe un criterio común para expresar el desempeño de los modelos propuestos mediante indicadores estadísticos. Esta investigación es un ejemplo claro de que el coeficiente de determinación de un análisis de regresión, por sí solo, puede ser estadísticamente significativo del ajuste entre valores medidos y observados, pero no necesariamente representa la bondad de las predicciones, para lo que es necesario recurrir a otros indicadores como el error medio absoluto o el error porcentual entre otros. Una concreción acerca de qué tipo de análisis y de indicadores son los más adecuados para la validación de simulaciones de CM generados por LEAAT permitiría comprender con mayor profundidad otros trabajos y prever su alcance en diferentes zonas, así como establecer comparaciones más estrechas con otras metodologías al objeto de aunar las fortalezas de cada una y esto contribuiría al desarrollo de modelos más precisos de exposición a CM de FEB.

6.5. Conclusiones del capítulo

La cartografía digital para el modelado del terreno disponible en la actualidad permite generar modelados de alta precisión del relieve en zonas urbanas residenciales y de sus líneas eléctricas aéreas para, a partir de ellos, obtener valores de CM en ubicaciones concretas del espacio o representados como superficies continuas de estos valores. La confiabilidad obtenida para estas superficies permite ser aplicada en estudios epidemiológicos, si bien sería necesario disponer de datos concretos y completos sobre las líneas eléctricas que quieran ser consideradas.

Aunque serían necesarios más trabajos al objeto de comprobar el buen desempeño de estos modelados de valores de CM en zonas con diferente topografía y características urbanas, la capacidad de predicción de estos se encuentra condicionada en gran medida por la precisión de los modelos digitales del terreno, los cuales cada vez más se encuentran disponibles en servidores públicos de datos geoespaciales con resoluciones elevadas y precisiones centimétricas.

Otra limitación también relacionada con los datos de entrada es la sujeta a la disponibilidad de los parámetros geométricos y mecánicos de la catenaria (altura libre de apoyos, separación de fases, tensión mecánica de los cables) para realizar el modelado 3D de la línea eléctrica. Si los datos deben obtenerse a partir de mediciones in situ puede no ser viable en proyectos de gran escala y si se basa en valores supuestos, podría afectar la validez de los resultados.

Cuando esta limitación puede salvarse, el modelado preciso mediante SIG 3D desarrollado en este trabajo permite que las inspecciones in situ para la toma de datos o mediciones de distancias, o la aplicación de factores de corrección en función de la pendiente del terreno para los que no existía alternativa en estudios epidemiológicos previos puedan reducirse o eliminarse, dando lugar a una importante optimización de recursos y favoreciendo la realización de estudios epidemiológicos de manera mucho más eficiente.

Es importante destacar que en este trabajo no se han considerado series históricas de datos de carga de línea para obtener promedios de exposición de largo plazo y que las superficies obtenidas representan la exposición promedio diaria de un día concreto. Otras limitaciones inherentes al método de cálculo aplicado para obtener los valores de CM según la expansión en serie de la ley de Biot-Savart aplicada a conductores rectilíneos indefinidos, es que incluso habiendo mejorado el modelo de cálculo al tener en cuenta la altura variable de los conductores según la catenaria que describen, este método de cálculo sólo resulta válido a distancias que sean mayores que el espaciamiento entre las fases de la línea eléctrica. Por lo tanto, este modelo no es adecuado para estudiar la exposición a CM en ecosistemas que puedan encontrarse a escasos metros de los conductores, como pueden ser las aves que anidan en las torres eléctricas.

No obstante, la posibilidad que ofrece el modelo que se ha propuesto de generación de superficies de CM mediante SIG 3D de poder expresar los resultados como superficies continuas de CM proporciona perspectivas mucho más completas de la afectación del CM en el entorno en el que se estudia. Así mismo, estas pueden ser aplicadas como datos de entrada en estudios multicriterio basados en el álgebra de mapas, para combinarlos con otras superficies que representen otros factores ambientales de interés. En términos generales, los resultados han demostrado que a través de la metodología aplicada en este trabajo es posible obtener mapas precisos de CM, que podrían ser utilizados en política ambiental para mejorar la información pública (Parlamento Europeo, 2009), la planificación relativa a LEAAT (PACE, 2011) y la comparación de ecosistemas terrestres antes y después de una nueva instalación y/o ubicados a diferentes intensidades de ELF-MF (SCENIHR, 2009).

Los resultados de este trabajo fueron publicados en noviembre de 2021 en la revista *Science of The Total Environment* en el artículo de título “3D GIS for surface modelling of magnetic fields generated by overhead power lines and their validation in a complex urban area” (Miravet-Garret et al. 2021b).

7. CONCLUSIONES

El modelado de la caracterización de la exposición residencial a CM generados por LEAAT en grandes territorios supone una tarea de enorme complejidad y que, por tanto, requiere una importante inversión de recursos. El entorno más próximo a la línea eléctrica, donde los niveles de exposición pueden alcanzar valores críticos, exige una especial atención que suele implicar trabajos presenciales de reconocimiento y toma de datos in situ o una revisión exhaustiva de mapas, lo que dificulta aún más estas investigaciones. Incluso cuando se aborda la exposición residencial a CM mediante aproximaciones basadas en la distancia a las líneas, la elevada influencia de este factor en el valor del campo magnético también exige que este sea reproducido con la mayor exactitud posible. Para ello resulta fundamental, por un lado, considerar el pandeo íntegro de la línea eléctrica, asumiendo la catenaria que describen los cables. Por otro, es necesario incluir la topografía del terreno, ya que en grandes extensiones territoriales puede ser muy variable. Cuando, además, el objetivo de un estudio es determinar la posible asociación de una enfermedad con una prevalencia baja, con valores de un agente contaminante que varía a escalas muy pequeñas, tal y como es la inducción magnética de FEB, los modelados deben lo más completos y fidedignos posible para que los cálculos basados en ellos también lo sean.

En zonas con un relieve complejo, la no consideración de este puede ser una causa importante de estimaciones erróneas de CM. Además, si el terreno presenta un relieve variable, existen grandes posibilidades de que las líneas eléctricas aéreas que discurran por él tengan vanos con desniveles importantes. En estas condiciones, para calcular valores precisos del CM la catenaria no puede ser aproximada por una parábola, menos aún por un conductor rectilíneo indefinido con altura promediada o en el peor de los casos, sin altura ninguna.

Las técnicas actuales y el desarrollo de algoritmos matemáticos para la extracción de datos geospaciales pertenecientes a LEAAT cada vez están más cerca de poder proporcionar modelados de alta precisión para cualquier entorno geográfico, aunque todavía las principales limitaciones se encuentran sujetas al procesado de los grandes volúmenes de datos que requiere, y a que cuando sea abordable incluso para trabajar con

los tamaños correspondientes que implican una red de distribución eléctrica regional o nacional, estos sean accesibles para la comunidad científica.

Mientras tanto, el modelado tridimensional de las zonas de estudio mediante SIG 3D puede aportar una optimización de las metodologías de estimaciones de la exposición a CM en estudios epidemiológicos, reduciendo o evitando las inspecciones de los sitios, la generación de mapas de líneas eléctricas basados en valores promedios o la calibración aproximada de los valores de CM mediante factores de corrección basados en los desniveles del terreno. Así mismo, tal y como se ha demostrado en esta tesis doctoral, puede proporcionar superficies de valores de CM a la cota real del terreno, para fines de representación o análisis espacial.

En este trabajo se aporta además un modelo que suministra valores precisos de distancias geométricas entre el punto de cálculo y la fuente emisora de CM, lo que abre una nueva vía de investigación dentro de los sustitutos de la exposición, refinando el concepto de proximidad. De la misma manera, también permitiría redefinir el método de código de cables que también basa parte de la categorización de la exposición en la distancia.

Las futuras líneas de investigación que se derivan de esta tesis doctoral vienen marcadas principalmente por las limitaciones y oportunidades de los trabajos que han sido llevados a cabo. Dentro de estas últimas, la afirmación formal sobre la validez de este método a escala regional o nacional sólo pasa por aplicarlo a un proyecto de esa índole. Sin embargo, disponer de datos precisos de las LEAAT en estas circunstancias puede ser muy complicado, por lo que debería realizarse con datos generalizados y comprobar la validez de la metodología. Al adoptar estas generalizaciones tal y como hacen otros investigadores, las principales aportaciones de la metodología que se ha propuesto sería la automatización en la consideración del relieve del terreno y la generación de datos de CM en formato de cobertura o ráster.

Son varias las propuestas de investigación que tendrían como finalidad poder prever con mejor criterio cuan generalizable es este modelo:

- Repetir la metodología propuesta en esta tesis doctoral en áreas de diferentes características, como zonas rurales con distintos grados de vegetación, así como zonas urbanas con una mayor densidad de edificios altos. Esta propuesta se fundamenta en que la precisión de los MDS suele ser más baja en zona urbanísticas que en zonas despejadas y que en zonas de edificios altos, los errores en los MDS obtenidos mediante datos LIDAR que son los que ofrecen mayor resolución, son más sensibles a errores de elevación.
- También sería interesante analizar las precisiones en la generación de las superficies de CM para diferentes discretizaciones de la catenaria. En este trabajo se ha propuesto su discretización cada medio metro, pero podrían replantearse espaciados mayores o incluso otras conceptualizaciones de la catenaria, como puede ser la propuesta por Cruz-Romero, (2000) en dos tramos lineales entre anclajes y punto más bajo de la misma. Ello permitiría optimizar los tiempos de procesado de las operaciones espaciales y incrementar la extensión geográfica de las zonas a modelar sin detrimento de su calidad.
- Las superficies se han generado a partir de mallas de puntos de densidades muy altas (5 y 10 m). Con la finalidad de hacer más generalizable esta metodología, deberían testarse densidades menores.
- Sería interesante comprobar en un estudio a gran escala, por ejemplo, para la capital de Málaga, en que grado la distancia geométrica obtenida mediante estos modelados 3D mediante SIG constituyen un sustituto de la exposición a CM más precisos que la mera distancia horizontal, tanto cuando estos modelados se realizan a partir de datos geométricos precisos de las líneas eléctricas o a partir de datos promediados. Esta propuesta de investigación también sería aplicable a la caracterización de la exposición basada en el código de cables, el cual se fundamenta fuertemente en la distancia a las LEAAT.

Otras propuestas de investigación vienen determinadas por el método de cálculo de CM que se ha adoptado en esta investigación. Estas son:

- La realización de más pruebas en terrenos despejados y planos para evaluar en qué entornos nuestro modelo para obtener valores de CM es más preciso que otros que no consideran el terreno, pero aplican métodos de cálculo de la intensidad de CM más sofisticados.
- La implementación en un SIG de métodos 3D de cálculo de la inducción magnética, así como la consideración del efecto tierra en los cálculos también se abre como una futura línea de investigación.

Este estudio, al estar basado en modelados tridimensionales de elevada precisión de la zona de estudio también ofrece replantearse algunas conceptualizaciones para las cuales estos modelados ofrecen alternativas. Estas son:

- El modelo propuesto, dado que permite el cálculo del CM a cualquier cota, podría definir valores de exposición residencial más coherentes con las tipologías urbanísticas y que no se encontrarán limitados a la aceptación general de los estudios epidemiológicos, en los que se asume su adecuada representatividad a 1 metro sobre el suelo. Esta posición de cálculo y medida del CM parte de la premisa de que las personas pasan el mayor porcentaje de las horas del día en el dormitorio. En viviendas unifamiliares distribuidas de forma íntegra en una sola planta, estos si se ubican en la planta baja, por lo que puede aceptarse esa altura sobre el suelo, pero, en muchas ciudades, son más habituales las viviendas de dos o más plantas en las que los dormitorios están ubicados en las plantas superiores, por lo que esta consideración de un metro sobre el suelo pierde cierto sentido. En la actualidad, es posible obtener modelados urbanísticos de alta precisión a partir de datos LIDAR o incluso ya procesados en modelos digitales de superficie normalizados que posibilitarían determinar los valores de campo magnético a una altura dentro de las viviendas determinada a partir de los tejados y no del suelo, que permitía ubicar con mejor precisión los dormitorios, dando un giro a tal y como se vienen estableciendo desde los inicios de la investigación epidemiológica a CM. Estas concreciones en los valores de distancia, aunque puedan parecer insignificantes, aproximan aún más estas distancias supuestas a los valores reales y, por ende, a

valores más fiables de exposición residencial a CM. Cuanto mejor se defina este parámetro, mejor se definirá el valor del CM buscado.

- De la misma manera, estos modelados 3D urbanísticos posibilitan también la estimación de la población expuesta pudiendo incluir aquella residente en edificios de varias plantas, siempre que pueda disponerse de un censo de población geocodificado, lo que en la actualidad suelen encontrarse implementados en cualquier administración local. Combinando además esta metodología con la propuesta por Marín-Granados (2012) para la evaluación del CM para cualquier planta de un edificio, sería posible obtener mapas que además de representar gráficamente el valor del CM sobre el suelo incorporen la representación gráfica estos valores sobre las diversas plantas de los edificios.

En términos generales, es posible concluir que la necesidad de seguir investigando los posibles efectos adversos para la salud de los campos magnéticos generados por líneas eléctricas y su posible efecto al combinarse con otros tipos de radiación electromagnética u otros factores de contaminación ambiental, junto con las necesidades de planificación urbanística debido a la importante expansión de muchas ciudades hacia el entorno de redes eléctricas de alta tensión, justifican que la metodología desarrollada en esta tesis doctoral sea una herramienta de especial interés. Además, su aportación en un marco gubernamental, estriba en que este trabajo posibilita obtener mapas precisos de CM que podrían ser utilizados en política ambiental para mejorar la información pública (European Parliament, 2009), la planificación del trazado de las LEAAT al objeto de garantizar la salud de la población de su entorno (PACE, 2011) y la comparación de ecosistemas terrestres antes y después de una nueva instalación y/o ubicados a diferentes intensidades de CM_FEB (SCENIHR, 2009).

8. BIBLIOGRAFÍA

- Adam, J. F., Bradbury, J., Charman, W. R., Orawski, G., & Vanner, M. J. (1984). Overhead lines—some aspects of design and construction. *IEE Proceedings C Generation, Transmission and Distribution*, 131(5), 149. <https://doi.org/10.1049/IP-C.1984.002510.1049/IP-C.1984.0025>
- AENOR, 1991. *Vocabulario electrotécnico. Líneas Aéreas*. UNE 31302-466: 1991. Madrid: AENOR, 1991.
- AENOR, 2004. *Procedimientos normalizados para la medida de los campos eléctricos y magnéticos de frecuencia industrial producidos por las líneas eléctricas de alta tensión*. UNE 215001:2004. Madrid: AENOR, 2004.
- AENOR, 2017. *Líneas eléctricas aéreas de más de 1 kV en corriente alterna. Parte 1: Requisitos generales. Especificaciones comunes*. UNE-EN 50341-1:2017. Madrid: AENOR, 2017.
- Ahlbom, A., Cardis, E., Green, A., Linet, M., Savitz, D., & Swerdlow, A. (2001). Review of the epidemiologic literature on EMF and health. In *Environmental Health Perspectives* (Vol. 109, Issue SUPPL. 6, pp. 911–933). Public Health Services, US Dept of Health and Human Services. <https://doi.org/10.1289/ehp.109-1240626>
- Ahlbom, A., Day, N., Feychting, M., Roman, E., Skinner, J., Dockerty, J., Linet, M., McBride, M., Michaelis, J., Olsen, J. H., Tynes, T., & Verkasalo, P. K. (2000). A pooled analysis of magnetic fields and childhood leukaemia. *British Journal of Cancer*, 83(5), 692–698. <https://doi.org/10.1054/bjoc.2000.1376>
- Ahmadi, A., Esmailzadeh, S., Delavar, M. A., Aleyassin, A., & Gholamian, S. A. (2019). Exposure to Electromagnetic Fields of High Voltage Overhead Power Lines and Female Infertility. *Int J Occup Environ Med*, 10, 11–16. <https://doi.org/10.15171/ijoem.2019.1429>
- Alihodzic, A., Mujezinovic, A., & Turajlic, E. (2021). Electric and Magnetic Field Estimation under Overhead Transmission Lines Using Artificial Neural Networks. *IEEE Access*, 9, 105876–105891. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3099760>
- Alihodzic, A., Mujezinovic, A., Turajlic, E., & Dedovic, M. M. (2022). Determination of Electric and Magnetic Field Calculation Uncertainty in the Vicinity of Overhead Transmission Lines. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, 12(3), 392–413. <https://doi.org/10.1590/2179-10742022v21i3262024>
- Amoon, A. T., Crespi, C. M., Ahlbom, A., Bhatnagar, M., Bray, I., Bunch, K. J., Clavel, J., Feychting, M., Hémon, D., Johansen, C., Kreis, C., Malagoli, C., Marquant, F., Pedersen, C., Raaschou-Nielsen, O., Röösl, M., Spycher, B. D., Sudan, M., Swanson, J., ... Kheifets, L. (2018). Proximity to overhead power lines and childhood leukaemia: an international pooled analysis. *British Journal of Cancer*, 119(3), 364–373. <https://doi.org/10.1038/s41416-018-0097-7>

- Amoon, A. T., Swanson, J., Vergara, X., & Kheifets, L. (2020). Relationship between distance to overhead power lines and calculated fields in two studies. *Journal of Radiological Protection*, 40(2), 431–443. <https://doi.org/10.1088/1361-6498/ab7730>
- ASPRS Guidelines Vertical Accuracy Reporting for Lidar Data. (2004). www.ndep.gov.
- Awrangjeb, M. (2019). Extraction of power line pylons and wires using airborne LiDAR data at different height levels. *Remote Sensing*, 11(15). <https://doi.org/10.3390/rs11151798>
- Azpuruá, M., & dos Ramos, K. (2010). A comparison of spatial interpolation methods for estimation of average electromagnetic field magnitude. In *Progress In Electromagnetics Research M* (Vol. 14, pp. 135–145). EMW Publishing. <https://doi.org/10.2528/PIERM10083103>
- Baldi, I., Coureau, G., Jaffré, A., Gruber, A., Ducamp, S., Provost, D., Lebailly, P., Vital, A., Loiseau, H., & Salamon, R. (2011). Occupational and residential exposure to electromagnetic fields and risk of brain tumors in adults: A case-control study in Gironde, France. *International Journal of Cancer*, 129(6), 1477–1484. <https://doi.org/10.1002/IJC.25765>
- Baris, D., Linet, M. S., Tarone, R. E., Kleinerman, R. A., Hatch, E. E., Kaune, W. T., Robison, L. L., Lubin, J., & Wacholder, S. (1999). Residential exposure to magnetic fields: an empirical examination of alternative measurement strategies. *Occupational and Environmental Medicine*, 56(8), 562–566. <https://doi.org/10.1136/OEM.56.8.562>
- Bavastro, D., Canova, A., Freschi, F., Member, S., Giaccone, L., & Manca, M. (2015). Magnetic Field Mitigation at Power Frequency: Design Principles and Case Studies. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*, 51(3). <https://doi.org/10.1109/TIA.2014.2369813>
- Bendík, J., Cenký, M., Eleschová, Ž., Beláň, A., Cintula, B., & Janiga, P. (2021). Comparison of electromagnetic fields emitted by typical overhead power line towers. *Electrical Engineering*, 103(2), 1019–1030. <https://doi.org/10.1007/S00202-020-01140-1/FIGURES/12>
- Bessou, J., Deschamps, F., Figueroa, L., & Cougnaud, D. (2013). Methods used to estimate residential exposure to 50 Hz magnetic fields from overhead power lines in an epidemiological study in France. *Journal of Radiological Protection*, 33(2), 349–365. <https://doi.org/10.1088/0952-4746/33/2/349>
- Bivand, R. S., Pebesma, E., & Gómez-Rubio, V. (2013). Applied Spatial Data Analysis with R: Second Edition. *Applied Spatial Data Analysis with R: Second Edition*, 1–405. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7618-4/COVER>
- Blaasaas, K. G., & Tynes, T. (2002). Comparison of Three Different Ways of Measuring Distances between Residences and High Voltage Power Lines. *Bioelectromagnetics*, 23(4), 288–291. <https://doi.org/10.1002/bem.10024>
- Bracken, M. B., Belanger, K., Hellenbrand, K., Adesso, K., Patel, S., Triche, E., & Leaderer, B. P. (1998). Correlates of Residential Wiring Code Used in Studies of Health Effects of Residential Electromagnetic Fields. *American Journal of Epidemiology*, 148(5), 467–474. <https://doi.org/10.1093/OXFORDJOURNALS.AJE.A009672>

- Bracken, T. D., Kheifets, L. I., & Sussman, S. S. (1993). Exposure assessment for power frequency electric and magnetic fields (EMF) and its application to epidemiologic studies. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 3(1), 1–22.
- Bravo-Rodríguez, J., Del-Pino-López, J., & Cruz-Romero, P. (2019). *A Survey on Optimization Techniques Applied to Magnetic Field Mitigation in Power Systems*. <https://doi.org/10.3390/en12071332>
- Breytenbach, A., Niekerk, A. Van, & Van Niekerk, A. (2019). Analysing DEM errors over an urban region across various scales with different elevation sources. *South African Geographical Journal*, 102(2), 133–169. <https://doi.org/10.1080/03736245.2019.1648312>
- Budnik, K., & Machczyński, W. (2006). Contribution to studies on calculation of the magnetic field under power lines. *European Transactions on Electrical Power*, 16(4), 345–364. <https://doi.org/10.1002/ETEP.90>
- Bunch, K. J., Keegan, T. J., Swanson, J., Vincent, T. J., & Murphy, M. F. G. (2014). Residential distance at birth from overhead high-voltage powerlines: childhood cancer risk in Britain 1962–2008. *British Journal of Cancer*. <https://doi.org/10.1038/bjc.2014.15>
- Bürgi, A., Sagar, S., Struchen, B., Joss, S., & Rössli, M. (2017). Exposure modelling of extremely low-frequency magnetic fields from overhead power lines and its validation by measurements. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(9). <https://doi.org/10.3390/ijerph14090949>
- Calvente, I., Dávila-Arias, C., Ocón-Hernández, O., Pérez-Lobato, R., Ramos, R., Artacho-Cordón, F., Olea, N., Núñez, M. I., & Fernández, M. F. (2014). Characterization of Indoor Extremely Low Frequency and Low Frequency Electromagnetic Fields in the INMA-Granada Cohort. *PLOS ONE*, 9(9), e106666. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0106666>
- Campos Piedade, T., Freitas Melo, V., Cláudio Paula Souza, L., & Dieckow, J. (2014). Three-dimensional data interpolation for environmental purpose: lead in contaminated soils in southern Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment*, 186, 5625–5638. <https://doi.org/10.1007/s10661-014-3808-4>
- Carles, C., Esquirol, Y., Turuban, M., Piel, C., Migault, L., Pouchieu, C., Bouvier, G., Fabbro-Peray, P., Lebailly, P., & Baldi, I. (2020). *Residential proximity to power lines and risk of brain tumor in the general population*. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109473>
- Chari, M. V. K., Salon, S. J., Sheppard J. (2000). *Numerical methods in electromagnetism*. Academic Press. <http://www.sciencedirect.com:5070/book/9780126157604/numerical-methods-in-electromagnetism>
- Chen, Z., Gao, B., & Devereux, B. (2017). *State-of-the-art: DTM generation using airborne LIDAR data*. In *Sensors (Switzerland)* (Vol. 17, Issue 1). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/s17010150>
- CIGRÉ Working Group C4.204. (2009). *Mitigation Techniques of Power Frequency Magnetic Fields originated from Electric Power Systems* (CIGRÉ Technical Brochure, Ed.). <https://www.e-cigre.org/publications/detail/elt-242-10-mitigation-techniques-of-power-frequency-magnetic-fields-originated-from-electric-power-systems.html>

- Coleman, M., Bell, C., Taylor, H., & Primic-Zakelj, M. (1989). *Leukaemia and residence near electricity transmission equipment: a case-control study* (Vol. 99).
- Colin Bayliss, & Brian Hardy. (2011). *Transmission and Distribution Electrical Engineering- Chapter 26-high voltage direct current transmission. Transmission and distribution electrical engineering.* (4th ed.).
- Comelli, M., Benes, M., Bampo, A., & Villalta, R. (2007). A technical note about Phidel: a new software for evaluating magnetic induction field generated by power lines. *Radiation Protection Dosimetry*, 123(2), 182–189. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncl111>
- Comelli M, Colonna N, Licciardello C, & Licitra G. (2008). 3-Dimensional modelling in evaluating ELF fields exposure.
- Comelli M, & Zoppetti N. (2009). *La modellazione tridimensionale del campo magnetico generato da elettrodotti: le funzioni avanzate di PLEIA e l'interfacciamento con ArcScene e Google Earth.* <http://www.gdal.org/ogr/>
- Costea, M., & Băran, I. (2017). Side effects of the power frequency magnetic field mitigation. *2017 10th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering, ATEE 2017*, 330–335. <https://doi.org/10.1109/ATEE.2017.7905051>
- Council of the European Union. (1999). *Council Recommendation of 12 July 1999 on the limitation of exposure of the general public to electromagnetic fields (0 Hz to 300 GHz).* www.eur-lex.europa.eu
- Crespi, C. M., Vergara, X. P., Hooper, C., Oksuzyan, S., Wu, S., Cockburn, M., & Kheifets, L. (2016). *Childhood leukaemia and distance from power lines in California: a population-based case-control study.* 115. <https://doi.org/10.1038/bjc.2016.142>
- Cruz-Romero, P. (2000). *Análisis, cálculo y técnicas de mitigación de campos magnéticos creados por líneas eléctricas de alta tensión.* <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=10437&info=resumen&idioma=SPA>
- Decat, G., Deckx, L., Wilczek, D., & Meynen, G. (2009). Monitoring campaign of the 50 Hz magnetic field for the estimation of the proportion of Belgian children exposed to the epidemiological cut-off points of 0.2, 0.3, and 0.4 microTesla. *Final Report of the BBEMG Research Contract*, 1–62.
- Dein, A. Z. El, Gouda, O. E., Lehtonen, M., & Darwish, M. M. F. (2022). Mitigation of the Electric and Magnetic Fields of 500-kV Overhead Transmission Lines. *IEEE Access*, 10, 33900–33908. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3161932>
- Deshayes-Pinçon, F., Morlais, F., Roth-Delgado, O., Merckel, O., Lacour, B., Launoy, G., Launay, L., & Dejardin, O. (2023). Estimation of the general population and children under five years of age in France exposed to magnetic field from high or very high voltage power line using geographic information system and extrapolated field data. *Environmental Research*, 232. <https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2023.116425>
- Deželak, K., Štumberger, G., & Jakl, F. (2011). Emissions of electromagnetic fields caused by sagged overhead power lines. *Przegľad Elektrotechniczny*, 29-32.

- Deltuva R, Lukočius R. (2020). Distribution of Magnetic Field in 400 kV Double-Circuit Transmission Lines. *Applied Sciences*. 2020; 10(9):3266. <https://doi.org/10.3390/app10093266>
- Dovan, T., Kaune, W. T., & Savitz, D. A. (1993). Repeatability of measurements of residential magnetic fields and wire codes. *Bioelectromagnetics*, 14(2), 145–159. <https://doi.org/10.1002/BEM.2250140207>
- Draper, G., Vincent, T., Kroll, M. E., & Swanson, J. (2005). Childhood cancer in relation to distance from high voltage power lines in England and Wales: A case-control study. *BMJ*, 330(7503), 1290. <https://doi.org/10.1136/bmj.330.7503.1290>
- Dubey, R., Bharadwaj, S., Sharma, V. B., Bhatt, A., & Biswas, S. (2022). SMARTPHONE-BASED TRAFFIC NOISE MAPPING SYSTEM. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 43(B4-2022), 613–620. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B4-2022-613-2022>
- Ebi, K. L. (1999). Developments in the generation and interpretation of wire codes. In *Radiation Protection Dosimetry* (Vol. 83, Issue 2). Nuclear Technology Publishing. <https://academic.oup.com/rpd/article/83/1-2/71/1661585>
- Ebi, K. L., Kheifets, L. I., Pearson, R. L., & Wachtel, H. (2000). Description of a new computer wire coding method and its application to evaluate potential control selection bias in the Savitz et al. childhood cancer study. *Bioelectromagnetics*, 21(5), 346–353. [https://doi.org/https://doi.org/10.1002/1521-186X\(200007\)21:5<346::AID-BEM3>3.0.CO;2-S](https://doi.org/https://doi.org/10.1002/1521-186X(200007)21:5<346::AID-BEM3>3.0.CO;2-S)
- Eichhorn, M., Thylmann, M., Peters, W., Kinast, P., Thrän, D., Bauschmann, M., Seitz, S., & Ponitka, J. (2018). Spatial distribution of overhead power lines and underground cables in Germany in 2016. *Data*, 3(3). <https://doi.org/10.3390/data3030034>
- El Dein, A. Z. (2009). Magnetic-field calculation under EHV transmission lines for more realistic cases. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 24(4), 2214–2222. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2009.2028794>
- Elaksher, A., Ali, T., & Alharthy, A. (2023). A Quantitative Assessment of LIDAR Data Accuracy. *Remote Sensing*, 15(2). <https://doi.org/10.3390/rs15020442>
- ENTSO-E. European Network of Transmission System Operator for Electricity (2023). Transmission system map. Consulta en línea, Agosto, 2023. <https://www.entsoe.eu/data/map/>
- EPRI, 2017. *AC Transmission Line Reference Book-200kV and Above, Edition*. (n.d.). Retrieved December 15, 2023, from <https://www.epri.com/research/products/3002007716>
- EPRI, 2024. Program 60: Electric and Magnetic Fields and Radio Frequency Health Assessment and Safety. Consulta en línea: enero 2024. <https://www.epri.com/research/programs/025025/overview>
- Escobar, A., Aponte, G., & Cadavid, H. (2007). *A Transmission Line Scale Model for Characterizing Electric and Magnetic Fields*. www.galita.univalle.edu.co

- Eskelinen, T., Keinänen, J., Salonen, H., & Juutilainen, J. (2002). Use of spot measurements for assessing residential ELF magnetic field exposure: A validity study. *Bioelectromagnetics*, 23(2), 173–176. <https://doi.org/10.1002/BEM.110>
- ESRI. (2011). *Geographic Information Systems and Environmental Health: Incorporating Esri Technology and Services. An Esri White Paper*. https://www.esri.com/library/whitepapers/pdfs/gis_and_env_health.pdf
- ESRI. (2016a). *El tamaño de la celda y el remuestreo en análisis*. <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/extensions/spatial-analyst/performing-analysis/cell-size-and-resampling-in-analysis.htm>
- ESRI. (2016b). *IDW—Raster Interpolation Toolset*. <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/3d-analyst-toolbox/idw.htm>
- ESRI. (2023). What are 3D Tools for Power Lines? <https://community.esri.com/t5/3d-blog/preview-of-3d-tools-for-power-lines/ba-p/899266>
- Esri U.S Federal Datasets. (2023). U.S. Electric Power Transmission Lines. Climate Mapping for Resilience and Adaptation (CMRA). U.S. Federal Geographic Data Committee (FGDC). Consulta en línea: septiembre de 2023. <https://hub.arcgis.com/datasets/fedmaps::u-s-electric-power-transmission-lines/about>
- European Commission. (2010). *Special Eurobarometer 347 / Wave 73.3 – TNS Opinion & Social*. <https://europa.eu/eurobarometer/surveys/detail/843>
- European Commission (COM).(2008). *Informe de la Comisión sobre la aplicación de la recomendación del Consejo 1999/519/CE, de 12 de julio de 1999, relativa a la exposición del público en general a los campos electromagnéticos de 0 HZ a 300 GHZ - Segundo informe de aplicación 2002-2007, /* COM/2008/0532 final */*, CELEX1. European Commission. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/5dbcd92f-7849-4017-8cee-742f40ff8143/language-es/format-PDF/source-search>
- Faure, E., Danjou, A. M. N., Clavel-Chapelon, F., Boutron-Ruault, M. C., Dossus, L., & Fervers, B. (2017). Accuracy of two geocoding methods for geographic information system-based exposure assessment in epidemiological studies. *Environmental Health: A Global Access Science Source*, 16(1). <https://doi.org/10.1186/s12940-017-0217-5>
- Felicísimo, A. M. (1994). *Modelos Digitales del Terreno*. <http://www.etsimo.uniovi.es/~feli>
- Feychting, M., Ahlbom, A., & Kheifets, L. (2004). EMF AND HEALTH. <https://doi.org/10.1146/Annurev.Publhealth.26.021304.144445>, 26, 165–189. <https://doi.org/10.1146/ANNUREV.PUBLHEALTH.26.021304.144445>
- Feychting, M., & Ahlbom, M. (1993). Magnetic fields and cancer in children residing near swedish high-voltage power lines. *American Journal of Epidemiology*, 138(7), 467–481. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aje.a116881>
- Filippopoulos, G., & Tsanakas, D. (2005). Analytical Calculation of the Magnetic Field Produced by Electric Power Lines. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, 20(2). <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2004.839184>

- Fisher, P. F., & Tate, N. J. (2006). Causes and consequences of error in digital elevation models. *Http://Dx.Doi.Org/10.1191/0309133306pp492ra*, 30(4), 467–489. <https://doi.org/10.1191/0309133306PP492RA>
- Fontani, F. (2017). Application of the Fisher’s “Horizon Viewshed” to a proposed power transmission line in Nozzano (Italy). *Transactions in GIS*, 21(4), 835–843. <https://doi.org/10.1111/tgis.12260>
- Frei, P., Poulsen, A. H., Mezei, G., Pedersen, C., Salem, L. C., Johansen, C., Rössli, M., & Schüz, J. (2013). *Original Contribution Residential Distance to High-voltage Power Lines and Risk of Neurodegenerative Diseases: a Danish Population-based Case-Control Study*. <https://doi.org/10.1093/aje/kws334>
- Friedman, D. R., Hatch, E. E., Tarone, R., Kaune, W. T., Kleinerman, R. A., Wacholder, S., Boice, J. D., & Linet, M. S. (1996). Childhood exposure to magnetic fields: residential area measurements compared to personal dosimetry. *Epidemiology (Cambridge, Mass.)*, 7(2), 151–155. <https://doi.org/10.1097/00001648-199603000-00008>
- Fulton, J. P., Cobb, S., Preble, L., Leone, L., & Forman, E. (1980). Electrical wiring configurations and childhood leukemia in Rhode Island. *American Journal of Epidemiology*, 111(3), 292–296. <https://doi.org/10.1093/OXFORDJOURNALS.AJE.A112899>
- García Santos, R. (1995). *Aplicaciones de los modelos digitales del terreno en ingeniería civil*. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=236604&info=resumen&idioma=SPA>
- Garrido, C., Otero, A. F., & Cidrás, J. (2003). Low-Frequency Magnetic Fields From Electrical Appliances and Power Lines. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, 18(4). <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2003.817744>
- Geri, A., Locatelli, A., & Veca, G. M. (1995). *Magnetic Fields Generated By Power Lines* (Vol. 31, Issue 3).
- Gervasi, F., Murtas, R., Decarli, A., & Russo, A. G. (2019). Residential distance from high-voltage overhead power lines and risk of Alzheimer’s dementia and Parkinson’s disease: a population-based case-control study in a metropolitan area of Northern Italy. *International Journal of Epidemiology*, 48(6), 1949–1957. <https://doi.org/10.1093/IJE/DYZ139>
- Google. (s.f.). Consulta en línea: julio de 2023.
- Gouda, O. E., Mostafa, ., & Al-Gabalawy, A. (2021). *Overhead transmission lines impacts on neighboring buried metallic gas pipelines*. 103, 3119–3137. <https://doi.org/10.1007/s00202-021-01300-x>
- Green, L. M., Miller, A. B., Agnew, D. A., Greenberg, M. L., Li, J., Villeneuve, P. J., & Tibshirani, R. (1999). Childhood leukemia and personal monitoring of residential exposures to electric and magnetic fields in Ontario, Canada. *Cancer Causes and Control*, 10(3), 233–243. <https://doi.org/10.1023/A:1008919408855>
- Greenland, S., Sheppard, A. R., Kaune, W. T., Poole, C., & Kelsh, M. A. (2000). A pooled analysis of magnetic fields, wire codes, and childhood leukemia. *Epidemiology*, 11(6), 624–634. <https://doi.org/10.1097/00001648-200011000-00003>

- Grellier, J., Ravazzani, P., & Cardis, E. (2014). Potential health impacts of residential exposures to extremely low frequency magnetic fields in Europe. *Environment International*, 62, 55–63. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2013.09.017>
- Gu, Y., Wang, Q., & Xie, B. (2017). Multiple Kernel Sparse Representation for Airborne LiDAR Data Classification. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55(2), 1085–1105. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2016.2619384>
- Guan, H., Yu, Y., Li, J., Ji, Z., & Zhang, Q. (2016). Extraction of power-transmission lines from vehicle-borne lidar data. *International Journal of Remote Sensing*, 37(1), 229–247. <https://doi.org/10.1080/01431161.2015.1125549>
- Habermann, M., Marcílio, I., Lopes, M., Prado, R., Souza, M., & Gouveia, N. (2010). Social inequality and exposure to magnetic fields in the metropolitan region of São Paulo, Southeastern Brazil. *Revista de Saúde Pública*, 44(4), 703–709. <https://doi.org/10.1590/S0034-89102010000400014>
- Hoffmann, W., Terschüeren, C., Heimpel, H., Feller, A., Butte, W., Hostrup, O., Richardson, D., & Greiser, E. (2008). Population-based research on occupational and environmental factors for leukemia and non Hodgkin's lymphoma: The Northern Germany Leukemia and Lymphoma Study (NLL). *American Journal of Industrial Medicine*, 51(4), 246–257. <https://doi.org/10.1002/ajim.20551>
- Horton, W. F., & Goldberg, Saul. (1995). *Power frequency magnetic fields and public health*. 276. https://books.google.com/books/about/Power_Frequency_Magnetic_Fields_and_Publ.html?hl=es&id=3s0PYR5Ku4cC
- Huss, A., Spoerri, A., Egger, M., & Rö, M. (2008). *Original Contribution Residence Near Power Lines and Mortality From Neurodegenerative Diseases: Longitudinal Study of the Swiss Population*. 169(2). <https://doi.org/10.1093/aje/kwn297>
- IARC. (2002). Non-ionizing Radiation, Part 1: Static and Extremely Low-frequency (ELF) Electric and Magnetic Fields. In *IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans / World Health Organization, International Agency for Research on Cancer* (Vol. 80, pp. 1–395). International Agency for Research on Cancer . <https://doi.org/10.1097/00004032-200212000-00021>
- IARC. (2013). Non-ionizing radiation, Part 2: Radiofrequency electromagnetic fields. In *IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans / World Health Organization, International Agency for Research on Cancer* (Vol. 102, Issue Pt 2, pp. 1–460). International Agency for Research on Cancer . <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4780878/>
- ICNIRP. (2010). Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz TO 100 kHz). *Health Physics*, 99(6), 818–836. <https://doi.org/10.1097/HP.0b013e3181f06c86>
- IEC. (2013). *Measurement of DC magnetic, AC magnetic and AC electric fields from 1 Hz to 100 kHz with regard to exposure of human beings - Part 1: Requirements for measuring instruments*. IEC 61786-1: 2013. International Electrotechnical Commission (IEC) , 2013.

- IEEE. (2013). *IEEE Guide for Planning and Designing Transition Facilities between Overhead and Underground Transmission Lines Sponsored by the Insulated Conductors Committee IEEE Power and Energy Society*.
- IEEE. (2020). *644-2019 - IEEE Standard Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields from AC Power Lines*. IEEE.
- IEEE Std 644-1994. (1994). *IEEE Standard Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields From AC Power Lines Transmission and Distribution*. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.
- IGN. 2023. Mapa de Red Eléctrica Española, Atlas de España. Energía. Instituto Geográfico Nacional. Consulta en línea: septiembre de 2023. https://atlasnacional.ign.es/index.php?title=Energ%C3%ADa&mobileaction=toggle_view_desktop
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection-ICNIRP. (1998). Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). *Health Physics*, 74(4), 494–522.
- JCGM. (2008). *Evaluation of measurement data-Guide to the expression of uncertainty in measurement Évaluation des données de mesure-Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure*. www.bipm.org
- Jeffers, D. E., Hatch, E. E., Lubin, J. H., Tarone, R. E., Wacholder, S., Kleinerman, R. A., Linet, M. S., & Kaune, W. T. (1999). Childhood leukemia and electrical appliances [1] (multiple letters). *Epidemiology*, 10(4), 465–467. <https://doi.org/10.1097/00001648-199907000-00022>
- Jiang, L., Hu, Y., Xia, X., Liang, Q., Soltoggio, A., & Kabir, S. R. (2020). A Multi-Scale Mapping Approach Based on a Deep Learning CNN Model for Reconstructing High-Resolution Urban DEMs. *Water*. <https://doi.org/10.3390/w12051369>
- Joseph, W., Vanhecke, K., Geuzaine, C., Verloock, L., Van Den Bossche, M., Verlaek, M., Goethals, M., & Martens, L. (2018). *QGIS Calculation Method for Evaluation of ELF Electromagnetic Field Exposure of General Public due to Overhead Power Lines*. <http://onelab.info>
- Junta de Extremadura. (2020). Cómo obtener altitudes ortométricas. Departamento de Expresión Gráfica. Escuela de Ingenierías Agrarias. http://rep.juntaex.es/webrep/files/docs/Alturas_ortometricas.pdf
- Kalair, A., Abas, N., & Khan, N. (2016). Comparative study of HVAC and HVDC transmission systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, 1653–1675. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2015.12.288>
- Kalt, G., Thunshirn, P., Wiedenhofer, D., Krausmann, F., Haas, W., & Haberl, H. (2021). A global inventory of electricity infrastructures from 1980 to 2017: Country-level data on power plants, grids and transformers. *Resources, Conservation and Recycling*, 173. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105723>

- Karipidis, K. K. (2015). Survey of residential power-frequency magnetic fields in Melbourne, Australia. *Radiation Protection Dosimetry*, *163*(1), 81–91. <https://doi.org/10.1093/RPD/NCU137>
- Kaune, W. T., Darby, S. D., Gardner, S. N., Hrubec, Z., Iriye, R. N., & Linet, M. S. (1994). Development of a protocol for assessing time-weighted-average exposures of young children to power-frequency magnetic fields. *Bioelectromagnetics*, *15*(1), 33–51. <https://doi.org/10.1002/BEM.2250150108>
- Kaune, W. T., Feychting, M., Ahlbom, A., Ulrich, R. M., & Savitz, D. A. (1998). Temporal Characteristics of Transmission-Line Loadings in the Swedish Childhood Cancer Study. In *Bioelectromagnetics* (Vol. 19).
- Kaune, W. T., & Savitz, D. A. (1994). Simplification of the Wertheimer-Leeper wire code. *Bioelectromagnetics*, *15*(4), 275–282. <https://doi.org/10.1002/BEM.2250150402>
- Kaune, W. T., Stevens, R. G., Callahan, N. J., Severson, R. K., & Thomas, D. B. (1987). Residential magnetic and electric fields. *Bioelectromagnetics*, *8*(4), 315–335. <https://doi.org/10.1002/BEM.2250080402>
- Kaune, W. T., & Zaffanella, L. E. (1992). Analysis of magnetic fields produced far from electric power lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, *7*(4), 2082–2091. <https://doi.org/10.1109/61.157011>
- Kavet, R., Zaffanella, L. E., Pearson, R. L., & Dallapiazza, J. (2004). Association of residential magnetic fields with contact voltage. *Bioelectromagnetics*, *25*(7), 530–536. <https://doi.org/10.1002/BEM.20033>
- Kheifets, L., Ahlbom, A., Crespi, C. M., Draper, G., Hagihara, J., Lowenthal, R. M., Mezei, G., Oksuzyan, S., Schüz, J., Swanson, J., Tittarelli, A., Vinceti, M., & Wunsch Filho, V. (2010). Pooled analysis of recent studies on magnetic fields and childhood leukaemia. *British Journal of Cancer*, *103*(7), 1128–1135. <https://doi.org/10.1038/sj.bjc.6605838>
- Kheifets, L., Crespi, C. M., Hooper, C., Oksuzyan, S., Cockburn, M., Ly, T., & Mezei, G. (2015). Epidemiologic study of residential proximity to transmission lines and childhood cancer in California: description of design, epidemiologic methods and study population. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, *25*, 45–52. <https://doi.org/10.1038/jes.2013.48>
- Kheifets, L., Kavet, R., & Sussman, S. S. (1997). Wire Codes, Magnetic Fields, and Childhood Cancer. In *Bioelectromagnetics* (Vol. 18). Wiley-Liss, Inc.
- Kholodkov, K. I., Ivanov, S. D., Aleshin, I. M., Perederin, F. V., Koryagin, V. N., Kholodkov, I. N., Aleshin, M. I., Matveev, M. A., & Morozov, Yu. A. (2022). Experience of Constructing Digital Elevation Models with Unmanned Aerial Vehicles. *Seismic Instruments*, *58*(3), 295–301. <https://doi.org/10.3103/s0747923922030070>
- Kirby, R. S., Delmelle, E., & Eberth, J. M. (2017). Advances in spatial epidemiology and geographic information systems. *Annals of Epidemiology*, *27*(1), 1–9. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.annepidem.2016.12.001>

- Kishore, T. S., & Singal, S. K. (2014). Optimal economic planning of power transmission lines: A review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 39, pp. 949–974). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.125>
- Kitic, N., Matic, P., Lekic, D., Mrcic, P., Erceg, B., Zeljkovic, C., & Starcevic, V. (2022). Real-Time Sag Estimation of Overhead Power Lines Based on Approximate Magnetic Field Model. *2022 21st International Symposium INFOTEH-JAHORINA, INFOTEH 2022 - Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/INFOTEH53737.2022.9751249>
- Kleinerman, R. A., Kaune, W. T., Hatch, E. E., Wacholder, S., Linet, M. S., Robison, L. L., Niwa, S., & Tarone, R. E. (2000). Are Children Living Near High-Voltage Power Lines at Increased Risk of Acute Lymphoblastic Leukemia? *American Journal of Epidemiology*, *151*(5), 512–515. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aje.a010237>
- Kokate, P. A., Mishra, A. K., Lokhande, S. K., & Bodhe, G. L. (2016). Extremely low frequency electromagnetic field (ELF-EMF) and childhood leukemia (CL) near transmission lines: A review. In *Advanced Electromagnetics* (Vol. 5, Issue 1, pp. 30–40). Advanced Electromagnetics. <https://doi.org/10.7716/aem.v5i1.348>
- Kostyszyn, R., & Miśków, D. (2022). Magnetic fields in the vicinity of high-voltage power lines, and optimization of conductor arrangement. *22*(123), 66–78. <https://doi.org/10.26408/123.06>
- Krajewski, W. (2010). Numerical evaluation of the magnetic field exposure near the transition tower of an overhead-underground HV line. *Progress In Electromagnetics Research M*, *14*, 247–261. <https://doi.org/10.2528/PIERM10101102>
- Kuznetsov, B., Bovdii, I., Voloshko, A., & Nikitina, T. (2018). Modeling and Active Shielding of Magnetic Field in Residential Buildings Located near Group of High Voltage Power Lines. *2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), 2018-January*, 106–109. <https://doi.org/10.1109/IEPS.2018.8559488>
- Lamkitja, S., & Tarateeraseth, V. (2023). Passive Techniques for Magnetic Field Mitigation in Underground Power Systems. *2023 20th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, ECTI-CON 2023*. <https://doi.org/10.1109/ECTI-CON58255.2023.10153381>
- Landini, M., Mazzanti, G., Sandrolini, L., & D’Adda, F. (2019). A Novel Algorithm for the 3D Calculation of the Magnetic Field Generated by Complex Configurations of Overhead Power Lines. *2019 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2019 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/EEEIC.2019.8783828>
- Lee, B. Y., Myung, S. H., Cho, Y. G., Lee, D. H., Lim, Y. S., & Lee, S. Y. (2011). Power frequency magnetic field reduction method for residents in the vicinity of overhead transmission lines using passive loop. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, *6*(6), 829–835. <https://doi.org/10.5370/JEET.2011.6.6.829>
- Legros, A., Bailey, W., Harrington, T., Hirata, A., Kavet, R. R., Keshvari, J., Klauenberg, B. J., Maxson, D., Osepchuk, J., Reilly, J. P., & Rob, R. (2019). *Synopsis of IEEE Std C95.1™-2019 “IEEE*

- Standard for Safety Levels With Respect to Human Exposure to Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields, 0 Hz to 300 GHz” To cite this version. 7, 171346–171356. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2954823>*
- Lehtomäki, M., Kukko, A., Matikainen, L., Hyyppä, J., Kaartinen, H., & Jaakkola, A. (2019). Power line mapping technique using all-terrain mobile laser scanning. *Automation in Construction, 105*. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.03.023>
- Leigh, C. L., Kidner, D. B., & Thomas, M. C. (2009). The Use of LiDAR in Digital Surface Modelling: Issues and Errors. *Transactions in GIS, 13*(4), 345–361. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9671.2009.01168.x>
- Levallois, P., Gauvin, D., St-Laurent, J., Gingras, S., & Deadman, J. E. (1995). Electric and magnetic field exposures for people living near a 735-kilovolt power line. *Environmental Health Perspectives, 103*(9), 832–837. <https://doi.org/10.1289/ehp.95103832>
- Lewis, R. C., Evenson, K. R., Savitz, D. A., & Meeker, J. D. (2015). Temporal Variability of Daily Personal Magnetic Field Exposure Metrics in Pregnant Women. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology, 25*(1), 58. <https://doi.org/10.1038/JES.2014.18>
- Lewis, R. C., Hauser, R., Maynard, A. D., Neitzel, R. L., Wang, L., Kavet, R., Morey, P., Ford, J. B., Meeker, J. D., & Team, E. S. (2016). PERSONAL MEASURES OF POWER-FREQUENCY MAGNETIC FIELD EXPOSURE AMONG MEN FROM AN INFERTILITY CLINIC: DISTRIBUTION, TEMPORAL VARIABILITY AND CORRELATION WITH THEIR FEMALE PARTNERS’ EXPOSURE. *Radiation Protection Dosimetry, 172*(4), 401–408. <https://doi.org/10.1093/RPD/NCV515>
- Li, C. Y., Sung, F. C., Chen, F. L., Lee, P. C., Silva, M., & Mezei, G. (2007). Extremely-low-frequency magnetic field exposure of children at schools near high voltage transmission lines. *Science of The Total Environment, 376*(1–3), 151–159. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2007.01.058>
- Li, M., Dai, W., Song, S., Wang, C., & Tao, Y. (2023). Construction of high-precision DEMs for urban plots. *Annals of GIS, 29*(2), 193–203. <https://doi.org/10.1080/19475683.2023.2182360>
- Li, Z., Zhu, Q., Gold, C., & Zhu Gold, L. (2005). *DIGITAL TERRAIN MODELING Principles and Methodology DIGITAL TERRAIN MODELING*. www.crcpress.com
- Lin, L. (2023). Geographic information data processing and physical simulation for power transmission lines. *Results in Physics, 51*. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2023.106674>
- Linnet, M. S., Hatch, E. E., Kleinerman, R. A., Robison, L. L., Kaune, W. T., Friedman, D. R., Severson, R. K., Haines, C. M., Hartsock, C. T., Niwa, S., Wacholder, S., & Tarone, R. E. (1997). Residential exposure to magnetic fields and acute lymphoblastic leukemia in children. *The New England Journal of Medicine, 337*(1), 1–8. <https://doi.org/10.1056/NEJM199707033370101>
- Liorni, I., Parazzini, M., Struchen, B., Fiocchi, S., Röösl, M., & Ravazzani, P. (2016). Children’s Personal Exposure Measurements to Extremely Low Frequency Magnetic Fields in Italy. *International Journal of Environmental Research and Public Health 2016, Vol. 13, Page 549, 13*(6), 549. <https://doi.org/10.3390/IJERPH13060549>

- London, S. J., Thomas, D. C., Bowman, J. D., Sobel, E., Cheng, T. C., & Peters, J. M. (1991). Exposure to Residential Electric and Magnetic Fields and Risk of Childhood Leukemia. *American Journal of Epidemiology*, 134(9), 923–937. <https://doi.org/10.1093/OXFORDJOURNALS.AJE.A116176>
- Lorensen, W. E., & Cline, H. E. (1987). Marching cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, 21(4), 163–169. <https://doi.org/10.1145/37402.37422>
- Luboš, M., Engst, P., & Jaňour, Z. (2006). A GIS-based approach to spatio-temporal analysis of environmental pollution in urban areas: A case study of Prague's environment extended by LIDAR data. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2006.05.018>
- Lucca, G. (2011). Magnetic field produced by power lines with complex geometry. *European Transactions on Electrical Power*, 21(1), 52–58. <https://doi.org/10.1002/etep.411>
- Magne, I., Souques, M., Bureau, I., Duburcq, A., Remy, E., & Lambrozo, J. (2017). Exposure of children to extremely low frequency magnetic fields in France: Results of the EXPERS study. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 27(5), 505–512. <https://doi.org/10.1038/JES.2016.59>
- Malagoli, C., Malavolti, M., Wise, L. A., Balboni, E., Fabbi, S., Teggi, S., Palazzi, G., Cellini, M., Poli, M., Zanichelli, P., Notari, B., Cherubini, A., Vinceti, M., & Filippini, T. (2023). Residential exposure to magnetic fields from high-voltage power lines and risk of childhood leukemia. *Environmental Research*, 232, 116320. <https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2023.116320>
- Mamishv, A. V., Nevels, R. D., & Russell, B. D. (1996). Effects of conductor sag on spatial distribution of power line magnetic field. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 11(3), 1571–1576. <https://doi.org/10.1109/61.517518>
- Marcilio, I., Gouveia, N., Leite, M., Filho, P., Leeka, I. I., & Iij, K. (2011). Adult mortality from leukemia, brain cancer, amyotrophic lateral sclerosis and magnetic fields from power lines: a case-control study in Brazil. In *Rev Bras Epidemiol* (Vol. 14, Issue 4).
- Marín Granados, M. D. (2012). *Análisis territorial de la exposición electromagnética residencial producida por las líneas eléctricas aéreas de alta tensión*. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=257307&info=resumen&idioma=SPA>
- Maslanyj, M., Simpson, J., Roman, E., & Schüz, J. (2009). Power frequency magnetic fields and risk of childhood leukaemia: misclassification of exposure from the use of the “distance from power line” exposure surrogate. *Bioelectromagnetics*, 30(3), 183–188. <https://doi.org/10.1002/bem.20465>
- Matikainen, L., Lehtomäki, M., Ahokas, E., Hyypä, J., Karjalainen, M., Jaakkola, A., Kukko, A., & Heinonen, T. (2016). *Remote sensing methods for power line corridor surveys*. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.04.011>
- McBride, M. L., Gallagher, R. P., Thériault, G., Armstrong, B. G., Tamaro, S., Spinelli, J. J., Deadman, J. E., Fincham, S., Robson, D., & Choi, W. (1999). Power-frequency electric and magnetic fields and risk of childhood leukemia in Canada. *American Journal of Epidemiology*, 149(9), 831–842. <https://doi.org/10.1093/OXFORDJOURNALS.AJE.A009899>

- Melo, A., & Mora, B. (2022). La geoestadística: la estadística aplicada a las ciencias de la tierra. In *Revista Sigma* (Vol. 18, Issue 1).
- Meng, X., Currit, N., & Zhao, K. (2010a). Ground filtering algorithms for airborne LiDAR data: A review of critical issues. *Remote Sensing*, 2(3), 833–860. <https://doi.org/10.3390/RS2030833>
- Meng, X., Currit, N., & Zhao, K. (2010b). Remote Sensing Ground Filtering Algorithms for Airborne LiDAR Data: A Review of Critical Issues. *Remote Sensing*, 2, 833–860. <https://doi.org/10.3390/rs2030833>
- Merchant C. J., Renew D. C., & Swanson J. (1994). Exposures to power-frequency magnetic fields in the home. *Journal of Radiological Protection*, 14(1), 77. <https://doi.org/10.1088/0952-4746/14/1/008>
- Meriouma, T., Bessedik, S. A., & Djekidel, R. (2021). Modelling of Electric and Magnetic Field Induction under Overhead Power Line Using Improved Simulation Techniques. *European Journal of Electrical Engineering*, 23(4), 289–300. <https://doi.org/10.18280/EJEE.230402>
- Mesa-Mingorance, J. L., & Ariza-López, F. J. (2020). remote sensing Accuracy Assessment of Digital Elevation Models (DEMs): A Critical Review of Practices of the Past Three Decades. *Remote Sensing*. <https://doi.org/10.3390/rs12162630>
- Mezei, G., Bracken, T. D., Senior, R., & Kavet, R. (2006). Analyses of magnetic-field peak-exposure summary measures. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 16(6), 477–485. <https://doi.org/10.1038/SJ.JEA.7500457>
- Mezei, G., & Kheifets, L. (2006). Selection bias and its implications for case-control studies: A case study of magnetic field exposure and childhood leukaemia. In *International Journal of Epidemiology* (Vol. 35, Issue 2, pp. 397–406). Oxford University Press on. <https://doi.org/10.1093/ije/dyi245>
- Miller, A. B., & Green, L. M. (2010). Electric and magnetic fields at power frequencies. *Chronic Dis Can*, 29, 69–83.
- Miller, C.L. and Laflamme, R.A. (1958) The Digital Terrain Model-: Theory & Application. MIT Photogrammetry Laboratory, Cambridge, MA, 20.
- Miravet-Garret, L., Blázquez -Parra; Elidia B., Marín-Granados, M. D., Ortiz-Zamora, F. J., Mora-Salgado, P., & Castillo-rueda, F. J. (2021). Error analysis of the simplification of 3D distances to overhead power lines. *ACM International Conference Proceeding Series*, 30–34. <https://doi.org/10.1145/3465222.3465225>
- Miravet-Garret, L., de Cózar-Macías, O.D., Blázquez-Parra, E.B., Marín-Granados, M.D., García-Gonzalez, J.B. (2021). 3D GIS for surface modelling of magnetic fields generated by overhead power lines and their validation in a complex urban area. *Sci. Total Environ.* 796, 148818 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148818>.
- Modrić, T., Vujević, S., & Lovrić, D. (2015b). A surface charge simulation method based on advanced numerical integration. *Advances in Engineering Software*, 86, 20–28. <https://doi.org/10.1016/J.ADVENGSOFT.2015.03.009>

- Modrić, T., Vujević, S., Majić, T., Modrić, T., Vujević, S., & Majić, T. (2014). Geometrical Approximation of the Overhead Power Line Conductors. *International Review on Modelling and Simulations (IREMOS)*, 7(1), 76–82. <https://doi.org/10.15866/IREMOS.V7I1.248>
- Modrić, T., Vujević, S., & Lovrić, D. (2015a). 3D computation of the power lines magnetic field. *Progress In Electromagnetics Research M*, 41, 1–9. <https://doi.org/10.2528/PIERM14122301>
- Moro, F., & Turri, R. (2008). Fast analytical computation of power-line magnetic fields by complex vector method. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 23(2), 1042–1048. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2007.915212>
- Moro, F., & Turri, R. (2012). Accurate calculation of the right-of-way width for the power line magnetic field impact assessment. In *Progress In Electromagnetics Research B* (Vol. 37).
- Moura, R. A. R., Assis, F. A., Schroeder, M. A. O., Resende, L. C., & Afonso, M. M. (2022). Optimization of Overhead Transmission Lines Power Transfer Capability with Minimizing Electric and Magnetic Fields. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 33(2), 574–587. <https://doi.org/10.1007/S40313-021-00794-X/FIGURES/7>
- Munn, K., & Dragičević, S. (2021). Spatial multi-criteria evaluation in 3D context: suitability analysis of urban vertical development. *Cartography and Geographic Information Science*, 48(2), 105–123. <https://doi.org/10.1080/15230406.2020.1845981>
- Muñoz, F., Aguado, J. A., Martín, F., López, J. J., Rodríguez, A., García, J. B., Treitero, A. R., & Molina, R. (2013). An intelligent computing technique to estimate the magnetic field generated by overhead transmission lines using a hybrid GA-Sx algorithm. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 53(1), 43–53. <https://doi.org/10.1016/J.IJEPES.2013.03.023>
- Muñoz Gutiérrez, F. J. (2011). *Nuevas tecnicas para la estimacion del campo magnetico generado por lineas electricas aereas de alta tension*. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=257614&info=resumen&idioma=SPA>
- Myers, A., Clayden, A. D., Cartwright, R. A., & Cartwright, S. C. (1990). Childhood cancer and overhead powerlines: a case-control study. *Br. J. Cancer*, 62, 1008–1014.
- Najjar, M. B., Jadayel, O., & Baarini, A. (2009). *Power magnetic fields exposure evaluation at North Lebanon: GIS Application*.
- National Grid UK. (2023). *Underground power cables*. <https://www.emfs.info/sources/underground/>
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Coastal Services Center. (2012). *Lidar 101: An Introduction to Lidar Technology, Data, and Applications*. Revised. Charleston, SC: NOAA Coastal Services Center.
- Neutra, R. R., & del Pizzo, V. (1996). When “Wire Codes” Predict Cancer Better Than Spot Measurements of Magnetic Fields. *Epidemiology*, 7(3). https://journals.lww.com/epidem/fulltext/1996/05000/when_wire_codes_predict_cancer_better_than_spot.1.aspx

- Norma GE CNL001: Conductores Desnudos Para Líneas Eléctricas Aéreas de Alta Tensión, de Tensión Nominal Superior a 30 KV, 1997 (2012).
- NRPB (2001) ELF Electromagnetic Fields and the Risk of Cancer: Report of an Advisory Group on Non-Ionising Radiation. Documents of the NRPB, Volume 12, No. 1.
- Ois Clinard, F., Milan, C., Harb, M., Carli, P.-M., Bonithon-Kopp, C., Moutet, J.-P., Faivre, J., & Hillon, P. (1999). Residential Magnetic Field Measurements in France: Comparison of Indoor and Outdoor Measurements. *Bioelectromagnetics*, 20, 319–326. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1521-186X\(1999\)20:5](https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-186X(1999)20:5)
- Olsen et al. (1988). *Magnetic fields from electric power lines Theory and comparasion to measurements*.
- Olsen, J. H., Nielsen, A., & Schulgen, G. (1993). Residence near high voltage facilities and risk of cancer in children. *British Medical Journal*, 307(6909), 891–895. <https://doi.org/10.1136/bmj.307.6909.891>
- Ortega, S., Trujillo, A., Santana, M., Suárez, P., & Santana, J. (2019). *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing Characterization and modeling of power line corridor elements from LiDAR point clouds*. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.03.021>
- Ou, Y. K. (2011). *Research and implementation on air pollution dispersion modeling system based on 3dgis and tgis-All Databases*. <https://www.webofscience.com/wos/allldb/full-record/PQDT:67364898>
- PACE, Asamblea Parlamentaria del Consejo de Europa. Resolución P6_TA(2009)0216 de 2 de abril de 2009 de *la Preocupación sobre la salud asociada a los campos electromagnéticos*. https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-6-2009-0216_EN.pdf
- PACE, Asamblea Parlamentaria del Consejo de Europa. Documento 12608 de 6 de mayo de 2011 sobre Peligros potenciales de los campos electromagnéticos y sus efectos sobre el medio ambiente. Comisión de Medio Ambiente, Agricultura y Asuntos Territoriales. http://www.apdr.info/electrocontaminacion/Documentos/Instituciones_Europeas/P.A.C.E.06.05.11_cas.pdf
- PACE, Asamblea Parlamentaria del Consejo de Europa. *Resolución 1815 de 6 de mayo de 2011 sobre Los peligros potenciales de los campos magnéticos y sus efectos sobre el medio ambiente*. <https://pace.coe.int/en/files/17994>.
- Park, J., Jeong, E., & Seomun, G. (2020). Extremely low-frequency magnetic fields exposure measurement during lessons in elementary schools. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(15), 1–13. <https://doi.org/10.3390/ijerph17155284>
- PCE Instruments. (2014). *Tester de radiación PCE-G28*. <https://www.pce-iberica.es/medidor-detalles-tecnicos/instrumento-de-radiacion/tester-de-radiacion-828.htm>
- Pedersen, C., Bräuner, E. V, Rod, N. H., Albieri, V., Andersen, C. E., Ulbak, K., Hertel, O., Johansen, C., Schüz, J., & Raaschou-Nielsen, O. (2014). *Distance to High-Voltage Power Lines and Risk of Childhood Leukemia-an Analysis of Confounding by and Interaction with Other Potential Risk Factors*. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0107096>

- Pedersen, C., Raaschou-Nielsen, O., Rod, N. H., Frei, P., Poulsen, A. H., Johansen, C., & Schüz, J. (2014). Distance from residence to power line and risk of childhood leukemia: A population-based case-control study in Denmark. *Cancer Causes and Control*, 25(2), 171–177. <https://doi.org/10.1007/s10552-013-0319-5>
- Peeroo, U., Idrees, M. O., & Saeidi, V. (2017). Building extraction for 3D city modelling using airborne laser scanning data and high-resolution aerial photo. *South African Journal of Geomatics*, 6(3), 363–376. <https://doi.org/10.4314/SAJG.V6I3.7>
- Pettersson P. (1992). Simple Method for Characterization of Magnetic Fields from Balanced Three-phase Systems. Proceedings Cigre Session, 1992, Paper 36-103.
- Piqueras Yepes, V. (2022, October 11). *Aproximación a la catenaria por medio de la parábola*. Universidad Politécnica de Valencia. <https://victoryepes.blogs.upv.es/2022/10/11/aproximacion-a-la-catenaria-por-medio-de-la-parabola/>
- Plan Nacional de Ortografía Aérea (PNOA). Instituto Geográfico Nacional. Gobierno de España. Consulta en línea 2023 <https://pnoa.ign.es/>
- Polat, N., Uysal, M., & Toprak, A. S. (2015). *An investigation of DEM generation process based on LiDAR data filtering, decimation, and interpolation methods for an urban area*. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.08.008>
- Pontius, R. G., Thontteh, O., & Chen, H. (2008). Components of information for multiple resolution comparison between maps that share a real variable. *Environmental and Ecological Statistics*, 15(2), 111–142. <https://doi.org/10.1007/s10651-007-0043-y>
- Prieto, J., Alonso, A. A., De La Rosa, R., & Carrera, A. (2015). Adaptive framework for uncertainty analysis in electromagnetic field measurements. *Radiation Protection Dosimetry*, 164(3), 422–434. <https://doi.org/10.1093/RPD/NCU260>
- Quan, H., Shi, X., Li, C., Geng, Y., & Huang, F. (2021). Transmission line inspection data visualization system based on 3D GIS. *Journal of Physics: Conference Series*, 2087(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2087/1/012086>
- Rabah, D., Ahmed, B. S., & Akef, S. (2019). ACCURATE COMPUTATION OF MAGNETIC INDUCTION GENERATED BY HV OVERHEAD POWER LINES. 32(2), 267–285. <https://doi.org/10.2298/FUEE1902267R>
- Rankin, R. F., Bracken, T. D., Senior, R. S., Kavet, R., & Montgomery, J. H. (2002). Results of a multisite study of U.S. residential magnetic fields. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 12(1), 9–20. <https://doi.org/10.1038/sj/jea/7500196>
- Rankovic´, V., Rankovic´, R., & Radulovic´, J. R. (2011). *Prediction of magnetic field near power lines by normalized radial basis function network*. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2011.06.008>
- Real Decreto 223/2008, de 15 de febrero, por el que se aprueban el Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en líneas eléctricas de alta tensión y sus

- instrucciones técnicas complementarias ITC-LAT 01 a 09. *Boletín Oficial del Estado*, n. 68 de 19 de marzo de 2008.
- Ren, L., Lu, H., He, L., & Zhang, Y. (2016). Characterization of monochlorobenzene contamination in soils using geostatistical interpolation and 3D visualization for agrochemical industrial sites in southeast China. *Archives of Environmental Protection*, 42(3), 17–24. <https://doi.org/10.1515/aep-2016-0025>
- Repacholi, H. M., & Greenebaum, B. (1999). Interaction of static and extremely low frequency electric and magnetic fields with living systems: Health effects and research needs. *Bioelectromagnetics*, 20(3), 133–160.
- Repacholi, M. (2012). Concern that “EMF” magnetic fields from power lines cause cancer. *Science of the Total Environment*, 426, 454–458. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.03.030>
- Research Center for Bioelectromagnetic Interaction (FEMU) of the Institute for Occupational, Social and Environmental Medicine of the Uniklinik RWTH Aachen University. (2023). *Study Overviews. Epidemiological studies on power frequency fields (50/60 Hz)*. <https://www.emf-portal.org/en/article/overview/power-line-frequencies-epidem#level-1>
- Research Center for Bioelectromagnetic Interaction (FEMU) of the Institute for Occupational, Social and Environmental Medicine of the Uniklinik RWTH Aachen University. (2024). *Power Supply. Overhead power lines*. <https://www.emf-portal.org/en/emf-source/72>
- Reynolds, P., Elkin, E., Scalf, R., Von Behren, J., & Neutra, R. R. (2001). A case-control pilot study of traffic exposures and early childhood leukemia using a geographic information system. *Bioelectromagnetics, Suppl 5*. [https://doi.org/10.1002/1521-186X\(2001\)22:5+<::AID-BEM1024>3.3.CO;2-0](https://doi.org/10.1002/1521-186X(2001)22:5+<::AID-BEM1024>3.3.CO;2-0)
- Rifai, A. and Hakami, M. (2014) Health Hazards of Electromagnetic Radiation. *Journal of Biosciences and Medicines*, 2, 1-12. doi: 10.4236/jbm.2014.28001.
- Rojas-Avellaneda, D. (2007). Spatial interpolation techniques for estimating levels of pollutant concentrations in the atmosphere. *Revista Mexicana de Física*, 53(6), 447–454. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0035-001X2007000600004&lng=es&nrm=iso&tlng=en
- Rothman, K. J., Greenland, S., & Associate, T. L. L. (2014). Modern Epidemiology, 3rd Edition. *The Hastings Center Report*, 44 Suppl 2. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24644503>
- Salari, J. C., Mpalantinos, A., & Silva, J. I. (2009). Comparative analysis of 2- and 3-D methods for computing electric and magnetic fields generated by overhead transmission lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 24(1), 338–344. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2008.923409>
- Savitz, D. A., Wachtel, H., Barnes, F. A., John, E. M., & Tvrdik, J. G. (1988). Case-control study of childhood cancer and exposure to 60-Hz magnetic fields. *American Journal of Epidemiology*, 128(1), 21–38. <https://doi.org/10.1093/OXFORDJOURNALS.AJE.A114943>

- Savitz, D. A., & Kaune, W. T. (1993). *Childhood Cancer in Relation to a Modified Residential Wire Code*.
- SCENIHR. (2015). *Opinion on Potential health effects of exposure to electromagnetic fields (EMF)*. <https://doi.org/10.2772/75635>
- SCENIHR. (2009). *Research needs and methodology to address the remaining knowledge gaps on the potential health effects of EMF*. http://ec.europa.eu/health/ph_risk/risk_en.htm
- Schoenfeld, E. R., Henderson, K., O'leary, E., Grimson, R., Kaune, W., & Leske, M. C. (1999). Magnetic Field Exposure Assessment: A Comparison of Various Methods. *Bioelectromagnetics*, 20, 487–496. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1521-186X\(199912\)20:8](https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-186X(199912)20:8)
- Schüz, J., Dasenbrock, C., Ravazzani, P., Rössli, M., Schär, P., Bounds, P. L., Erdmann, F., Borkhardt, A., Cobaleda, C., Fedrowitz, M., Hamnerius, Y., Sanchez-Garcia, I., Seger, R., Schmiegelow, K., Ziegelberger, G., Capstick, M., Manser, M., Müller, M., Schmid, C. D., ... Kuster, N. (2016). Extremely low-frequency magnetic fields and risk of childhood leukemia: A risk assessment by the ARIMMORA consortium. In *Bioelectromagnetics* (Vol. 37, Issue 3, pp. 183–189). Wiley-Liss Inc. <https://doi.org/10.1002/bem.21963>
- Schüz, J., Lagorio, S., & Bersani, F. (2009). Electromagnetic fields and epidemiology: an overview inspired by the fourth course at the International School of Bioelectromagnetics. *Bioelectromagnetics*, 30(7), 511–524. <https://doi.org/10.1002/BEM.20510>
- Scianna, A., & Ammoscato, A. (2010). 3D GIS DATA MODEL USING OPEN SOURCE SOFTWARE. In A. Peled (Ed.), *CORE SPATIAL DATABASES - UPDATING, MAINTENANCE AND SERVICES - FROM THEORY TO PRACTICE* (Vols. 38-4–8, Issue 2W, pp. 120–125).
- Sermage-Faure, C., Demoury, C., Rudant, J., Goujon-Bellec, S., Guyot-Goubin, A., Deschamps, F., Hemon, D., & Clavel, J. (2013). Childhood leukaemia close to high-voltage power lines - The Geocap study, 2002-2007. *British Journal of Cancer*, 108(9), 1899–1906. <https://doi.org/10.1038/bjc.2013.128>
- Shenkman, A., Sonkin, N., & Kamensky, V. (2005). Active protection from electromagnetic field hazards of a high voltage power line. In *HAIT Journal of Science and Engineering B* (Vol. 2, Issue 2).
- Sid ahmed, B., Houicher Rabah Djekidel, S., & Ahmed Bessedik, S. (2022). *Magnetic Field Variation Distribution of Overhead Electric Power Transmission Lines*. <https://www.researchgate.net/publication/366567668>
- Siemiatycki, J. (1993). Problems and priorities in epidemiologic research on human health effects related to wiring code and electric and magnetic fields. *Environmental Health Perspectives*, 101 Suppl 4(Suppl 4), 135–141. <https://doi.org/10.1289/EHP.93101S4135>
- Sivakami, P., & Subburaj, P. (2016). EMF Estimation of Over Head Transmission Line Using CS Algorithm with Aid of NFC. *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*, 8(3), 624–643. <https://doi.org/10.15676/IJEEI.2016.8.3.11>

- Skinner, J., Maslanyj, M. P., Mee, T. J., Allen, S. G., Simpson, J., Roman, E., & Day, N. E. (2000). Childhood cancer and residential proximity to power lines. *British Journal of Cancer*, *83*(11), 1573. <https://doi.org/10.1054/BJOC.2000.1550>
- Struchen, B., Liorni, I., Parazzini, M., Gängler, S., Ravazzani, P., & Rössli, M. (2015). Analysis of personal and bedroom exposure to ELF-MFs in children in Italy and Switzerland. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology* *2016* *26*:6, *26*(6), 586–596. <https://doi.org/10.1038/jes.2015.80>
- Swanson, J. (2008). Methods used to calculate exposures in two epidemiological studies of power lines in the UK. *Journal of Radiological Protection*, *28*(1), 45–59. <https://doi.org/10.1088/0952-4746/28/1/002>
- Swanson, J., & Bunch, K. J. (2018). Reanalysis of risks of childhood leukaemia with distance from overhead power lines in the UK. *Journal of Radiological Protection : Official Journal of the Society for Radiological Protection*, *38*(3), N30–N35. <https://doi.org/10.1088/1361-6498/AAC89A>
- Swanson, J., & Kaune, W. T. (1999). Comparison of Residential Power-Frequency Magnetic Fields Away from Appliances in Different Countries. In *Bioelectromagnetics* (Vol. 20, Issue 4, pp. 244–254). Wiley-Liss Inc. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1521-186X\(1999\)20:4<244::AID-BEM5>3.0.CO;2-2](https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-186X(1999)20:4<244::AID-BEM5>3.0.CO;2-2)
- Swanson, J., Kheifets, L., & Vergara, X. (2019). Changes over time in the reported risk for childhood leukaemia and magnetic fields. *Journal of Radiological Protection*, *39*(2), 470–488. <https://doi.org/10.1088/1361-6498/ab0586>
- Swedish Radiation Safety Authority. (2022). 2022:16: Recent Research on EMF and Health Risk. Sixteenth report from SSM's Scientific Council on Electromagnetic Fields, 2021. Consultado en línea (enero de 2024): <https://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/publikationer/rapporter/stralskydd/2022/202216/>
- Szuba, M. (2012). Environmental impact of high voltage overhead powerlines with low-sag wires. *PRZEGLAD ELEKTROTECHNICZNY*, *88*(5A), 143–146.
- Tong, Z. Y., Dong, Z. Y., & Tong, M. M. (2016). Analysis of magnetic field generated by overhead cables. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, *89*, 166–170. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.04.004>
- Turgeon, A., Maruvada, P. S., & Goulet, D. L. (1998). Application of GIS for the evaluation of human exposure to magnetic field in the vicinity of power lines. *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, *1*, 189–192. <https://doi.org/10.1109/ccece.1998.682714>
- Two Roger, S. S., Davis, S., Schwartz, S. M., & Mirick, D. K. (2002). Stability of Wertheimer–Leeper wire codes as a measure of exposure to residential magnetic fields over a 9- to 11-year interval. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology* *2002* *12*:6, *12*(6), 448–454. <https://doi.org/10.1038/sj.jea.7500246>

- Tynes, T., & Haldorsen, T. (1997). Electromagnetic fields and cancer in children residing near Norwegian high-voltage power lines. *American Journal of Epidemiology*, *145*(3), 219–226. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aje.a009094>
- UNESA, 1996. Protocolo para la medida del campo magnético. UNESA, abril 1996. Grupo ADHOC de campos electromagnéticos del grupo de trabajo de medio ambiente de UNESA. Madrid, 1996.
- Uriel Paredes Hernández, C., Enrique Salinas Castillo, W., Martínez Becerra, X., & Bernardo Jiménez Hernández, S. (2013). Evaluación y comparación de métodos de interpolación determinísticos y probabilísticos para la generación de modelos digitales de elevación. *Investigaciones Geográficas, Boletín Del Instituto de Geografía, UNAM*, 118–130.
- Valjus, J., Hongisto, M., Verkasalo, P., Järvinen, P., Heikkilä, K., & Koskenvuo, M. (1995). Residential exposure to magnetic fields generated by 110-400 kV power lines in Finland. *Bioelectromagnetics*, *16*(6), 365–376. <https://doi.org/10.1002/BEM.2250160604>
- Vergara, X. P., Kavet, R., Crespi, C. M., Hooper, C., Michael Silva, J., & Kheifets, L. (2015). Estimating magnetic fields of homes near transmission lines in the California Power Line Study. *Environmental Research*, *140*, 514–523. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2015.04.020>
- Verkasalo, P. K., Pukkala, E., Hongisto, M. Y., Valjus, J. E., Jarvinen, P. J., Heikkila, K. V., & Koskenvuo, M. (1993). Risk of cancer in Finnish children living close to power lines. *British Medical Journal*, *307*(6909), 895–899. <https://doi.org/10.1136/bmj.307.6909.895>
- Vidal Blanco, M. (2017). *Estudio eléctrico de líneas aéreas de alta tensión*. Universidad de Valladolid. Escuela de Ingenierías Industriales. Valladolid. Trabajo de Fin de Máster.
- Vistnes, A. I., Ramberg, G. B., Bjørnevik, L. R., Tynes, T., & Haldorsen, T. (1997). Exposure of Children to Residential Magnetic Fields in Norway: Is Proximity to Power Lines an Adequate Predictor of Exposure? *Bioelectromagnetics*, *18*(1), 47–57. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1521-186x\(1997\)18:1<47::aid-bem8>3.0.co;2-5](https://doi.org/10.1002/(sici)1521-186x(1997)18:1<47::aid-bem8>3.0.co;2-5)
- Vujevic, S., & Lovric, D. (2009). *Computation of the power line electric and magnetic fields*. <https://www.researchgate.net/publication/236882362>
- Wang, Y., Chen, Q., Liu, L., Zheng, D., Li, C., & Li, K. (2017). Supervised classification of power lines from airborne LiDAR data in Urban Areas. *Remote Sensing*, *9*(8). <https://doi.org/10.3390/rs9080771>
- Wani, Z. M., & Nagai, M. (2021). An approach for the precise DEM generation in urban environments using multi-GNSS. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, *177*. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109311>
- Wertheimer, N., & Leeper, E. (1979). Electrical wiring configurations and childhood cancer. *American Journal of Epidemiology*, *109*(3), 273–284. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aje.a112681>

- Wertheimer, Nancy., & Leeper, Ed. (1982). Adult Cancer Related to Electrical Wires Near the Home. *International Journal of Epidemiology*, 11(4), 345–355. <https://doi.org/10.1093/ije/11.4.345>
- WHO. (2007). *Environmental Health Criteria 238. Extremely Low frequency fields*. (World Health Organization, Ed.).
- WHO World Health Organization. (2023, July). *Electromagnetic fields and public health: exposure to extremely low frequency fields*. https://www.who.int/news-room/questions-and-answers/item/radiation-and-health?gclid=CjwKCAiAvoqsBhB9EiwA9XTWGQ3dteetGeMXfeAP2ctxqGKrlDgAGkPlqGnd75NZZU7CSpojzmWHKhoCRI8QAvD_BwE
- Willmott, C. J. (1982). Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin - American Meteorological Society*, 63(11), 1309–1313. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1982\)063<1309:SCOTEO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1982)063<1309:SCOTEO>2.0.CO;2)
- Wong, M. S., Nichol, J. E., & Lee, K. H. (2009). Modeling of Aerosol Vertical Profiles Using GIS and Remote Sensing. *Sensors*, 9, 4380–4389. <https://doi.org/10.3390/s90604380>
- Wünsch-Filho, V., Pelissari, D. M., Barbieri, F. E., Sant’Anna, L., de Oliveira, C. T., de Mata, J. F., Tone, L. G., Lee, M. L. de M., Andréa, M. L. M. de, Bruniera, P., Epelman, S., Filho, V. O., & Kheifets, L. (2011). Exposure to magnetic fields and childhood acute lymphocytic leukemia in São Paulo, Brazil. *Cancer Epidemiology*, 35(6), 534–539. <https://doi.org/10.1016/J.CANEP.2011.05.008>
- Yadav, M., & Chousalkar, C. G. (2017). *Extraction of power lines using mobile LiDAR data of roadway environment*. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2017.10.007>
- Yang, Y., Liu, Y. F., & Cao, Y. L. (2010). Study on a method of design for rural power distribution lines based on 3D GIS technology. *Mathematical and Computer Modelling*, 51(11–12), 1293–1298. <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2009.10.033>
- Yoonseok, J., & Gunho, S. (2012). A Piecewise Catenary Curve Model Growing for 3D Power Line Reconstruction. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 78(12), 1127–1240.
- Zaffanella, L. E., Kavet, R., Pappa, J. R., & Sullivan, T. P. (1997). Modeling magnetic fields in residences: validation of the rescalc program. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 7(2), 241–259. <https://europemc.org/article/med/9185015>
- Zagar, T., Valic, B., Kotnik, T., Korat, S., Tomsic, S., Zadnik, V., & Gajsek, P. (2023). Estimating exposure to extremely low frequency magnetic fields near high-voltage power lines and assessment of possible increased cancer risk among Slovenian children and adolescents. *Radiology and Oncology*, 57(1), 59–69. <https://doi.org/10.2478/RAON-2023-0002>
- Zhang, K., Gann, D., Ross, M., Biswas, H., Li, Y., & Rhome, J. (2019). *remote sensing Comparison of TanDEM-X DEM with LiDAR Data for Accuracy Assessment in a Coastal Urban Area*. <https://doi.org/10.3390/rs11070876>
- Zhang, K., Tarquini, S., Winsemius, H. C., Ward, P. J., Gayton, I., ten Veldhuis, M.-C., Meijer, D. H., Illiffe, M., Schumann, by, & J-p, G. (2019). Commentary: The Need for a High-Accuracy,

- Open-Access Global DEM A Commentary on The Need for a High-Accuracy, Open-Access Global DEM. *Frontiers in Earth Science | Www.Frontiersin.Org*, 1, 225. <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00033>
- Zhang, L. (2021). Research and application of 3D GIS in the visualization and information management of power grid construction projects. *Journal of Physics: Conference Series*, 2083(3). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2083/3/032024>
- Zhang, R., Yang, B., Xiao, W., Liang, F., Liu, Y., & Wang, Z. (2019). *remote sensing Automatic Extraction of High-Voltage Power Transmission Objects from UAV Lidar Point Clouds*. <https://doi.org/10.3390/rs11222600>
- Zhang, Y., Lai, J., Ruan, G., Chen, C., & Wang, D. W. (2016). Meta-analysis of extremely low frequency electromagnetic fields and cancer risk: A pooled analysis of epidemiologic studies. *Environment International*, 88, 36–43. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.12.012>
- Zhang, Y. Z. (2008). *Data organization and management of three-dimensional model in the power transmission network gis-All Databases*. Wuhan University (People's Republic of China). [https://www.webofscience.com/wos/alldb/full-record/PQDT:70877589\(overlay:export/exp\)](https://www.webofscience.com/wos/alldb/full-record/PQDT:70877589(overlay:export/exp))
- Zhou, P. (1993). Numerical Analysis of Electromagnetic Fields. *Numerical Analysis of Electromagnetic Fields*. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-50319-1>
- Zuo, J., Fan, J., Ouyang, Y., Liu, H., Yang, C., & Hao, C. (2022). Transmission Line Sag Measurement and Simulation Research Based on Non-Contact Electric Field Sensing. *Sensors*, 22(21). <https://doi.org/10.3390/s22218379>

9. ANEXOS

ANEXO I: Estatus legislativo de límites de exposición residencial a CM FEB en diferentes países. Fuente: adaptado de Rianne, 2018; WHO, 2023.

País	Estatus legislativo	Densidad del flujo magnético (μT)	Observaciones
Argentina		25	
Alemania	Obligatorio	100	Deben minimizar los campos magnéticos en instalaciones nuevas o reformadas. Las nuevas líneas de 220 kV no pueden sobrevolar edificios residenciales
Australia	Recomendado	100/1000	El mayor límite se aplica para exposiciones de pocas horas o minutos.
Austria	Recomendado	100	Para nuevas líneas que requieran evaluación de impacto ambiental, se fija a 1 μT
Bahréin	Obligatorio	100	
Bélgica		10	Recomendaciones gubernamentales de 0,2 μT para nuevas líneas y 0,4 μT para nuevos transformadores
Bulgaria			Establecen distancias mínimas a las líneas eléctricas
Brasil		83	
Croacia	Obligatorio	40/100	En viviendas, oficinas, escuelas, guarderías, parques infantiles, hospitales, residencias, instalaciones turísticas; para otros espacios públicos se aplican los niveles de referencia en 1999/519/EC
China	Obligatorio	100	
Chipre	Recomendado	100	
Dinamarca		100	Recomendaciones de las autoridades de construir alejadas edificaciones con niños de las líneas eléctricas y viceversa
España	Voluntaria	100	
Eslovaquia	Obligatorio	100	
Eslovenia	Obligatorio	10	Se aplica en hospitales, balnearios, edificios turísticos, públicos y de uso infantil incluidas áreas recreativas. También nuevas construcciones. Otros: niveles de referencia en 1999/519/EC
Estonia	Obligatorio	100	

País	Estatus legislativo	Densidad del flujo magnético (μT)	Observaciones
Finlandia	Recomendada	0.4/100/500	Se recomienda evitar la construcción edificaciones destinadas a niños en áreas con la densidad de flujo magnético $> 0,4 \mu\text{T}$; El mayor límite se aplica en exposiciones cortas.
Francia	Obligatorio	100/1	Se recomienda evitar la construcción edificaciones destinadas a niños en áreas con la densidad de flujo magnético $> 1 \mu\text{T}$
Grecia	Obligatorio	100	
Hungría	Obligatorio	100	
India			
Irán	Obligatorio	100	
Irlanda	Obligatorio	100	
Israel	Recomendado	0.4/100	El mayor límite es admisible para exposiciones de pocas horas.
Italia	Obligatorio	3/10/100	Para nuevas construcciones se recomienda no sobrepasar los $3 \mu\text{T}$. En caso de edificios residenciales o para exposiciones superiores a 4 horas, se establece un límite de precaución de $10 \mu\text{T}$.
Japón		200	
Malta	Recomendado	100	
Nueva Zelanda	Voluntario		
Latvia			
Lituania	Obligatorio	20	Dentro de edificios públicos o residenciales. Otros: $40 \mu\text{T}$
Luxemburgo	Obligatorio	100	También se establecen distancias mínimas a las líneas eléctricas de cumplimiento voluntario en nuevas construcciones
Países Bajos	Recomendado	200/0.4	Se recomienda evitar la construcción edificaciones destinadas a niños en áreas con la densidad de flujo magnético $> 0,4 \mu\text{T}$
Noruega	Obligatorio	0.4/200	Para nuevas edificaciones se establece un límite voluntario de $0,4 \mu\text{T}$
Nueva Zelanda		100	ICNIRP
Polonia	Obligatorio	48	
Portugal	Obligatorio	100	
República Checa	Obligatoria	200	

País	Estatus legislativo	Densidad del flujo magnético (μT)	Observaciones
República de Corea	Voluntario		
Rumania	Obligatorio	100	
Rusia	Obligatorio	5	Para viviendas, instituciones infantiles, preescolares, generales y médicas; locales no residenciales 10 μT , áreas habitadas al aire libre 20 μT , áreas deshabitadas 100 μT
Singapur	Recomendado		
Sudáfrica	Voluntario		
Suecia	Recomendado	100	
Suiza	Obligatorio	1	Para edificios sensibles (residenciales, sanitarios, uso infantil). Cualquier otro: límites en 1999/519/EC
Turquía	Recomendado	200	
Reino Unido	Recomendado	100/360	
Estados Unidos	Voluntario		La frecuencia de alimentación es de 60 Hz; sin regulación federal, límites en algunos estados, política de evasión prudente en otros (medidas para reducir la exposición a un costo razonable)

ANEXO II: Registro de medidas de la inducción magnética en cada eje para cada ubicación en la muestra distribuida en perfiles transversales.

Nº GPS						B eje (μ T)	Módulo (μ T)
1.0	1.99054063						
X	1.98	1.98	1.98	1.99	2	1.986	1.99054063
Y	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	
Z	0.12	0.14	0.11	0.14	0.16	0.134	
1.1	1.87520879						
X	1.77	1.79	1.79	1.78	1.78	1.782	1.87520879
Y	0.37	0.38	0.38	0.37	0.36	0.372	
Z	0.44	0.43	0.46	0.47	0.45	0.45	
1.2	IMPOSIBILIDAD DE ACCESO						
X							
Y							
Z							
1.3	IMPOSIBILIDAD DE ACCESO						
X							
Y							
Z							
1.4	IMPOSIBILIDAD DE ACCESO						
X							
Y							
Z							
1.5	IMPOSIBILIDAD DE ACCESO						
X							
Y							
Z							

Nº GPS						B eje (μ T)	Módulo (μ T)
1.6	1.89629112						
X	1.73	1.72	1.71	1.71	1.73	1.72	1.89629112
Y	0.2	0.18	0.2	0.18	0.18	0.188	
Z	0.76	0.75	0.79	0.79	0.79	0.776	
1.7	1.72798495						
X	1.32	1.32	1.3	1.31	1.32	1.314	1.72798495
Y	0.2	0.18	0.19	0.2	0.18	0.19	
Z	1.1	1.1	1.12	1.1	1.11	1.106	
1.8	1.44693696						
X	0.82	0.82	0.82	0.81	0.83	0.82	1.44693696
Y	0.07	0.07	0.058	0.08	0.08	0.0716	
Z	1.19	1.19	1.18	1.2	1.19	1.19	
1.9	IMPOSIBILIDAD DE ACCESO						
X							
Y							
Z							
1.10	IMPOSIBILIDAD DE ACCESO						
X							
Y							
Z							
2	2.11553208						
X	2.08	2.1	2.11	2.1	2.11	2.1	2.11553208
Y	0.07	0.11	0.11	0.14	0.17	0.12	
Z	0.19	0.21	0.23	0.23	0.27	0.226	
2.1	2.0883381						
X	1.96	1.96	1.97	1.97	1.98	1.968	2.0883381
Y	0.23	0.21	0.17	0.17	0.14	0.184	
Z	0.71	0.7	0.71	0.6	0.65	0.674	

Nº GPS						B eje (μ T)	Módulo (μ T)
2.2	IMPOSIBILIDAD DE ACCESO						
X							
Y							
Z							
2.3	IMPOSIBILIDAD DE ACCESO						
X							
Y							
Z							
2.4	IMPOSIBILIDAD DE ACCESO						
X							
Y							
Z							
2.5	IMPOSIBILIDAD DE ACCESO						
X							
Y							
Z							
2.6	1.97569735						
X	1.79	1.74	1.74	1.76	1.76	1.758	1.97569735
Y	0.1	0.1	0.11	0.1	0.09	0.1	
Z	0.84	0.88	0.89	0.94	0.93	0.896	
2.7	1.65174574						
X	1.14	1.14	1.12	1.11	1.13	1.128	1.65174574
Y	0.23	0.24	0.23	0.21	0.2	0.222	
Z	1.21	1.2	1.18	1.18	1.16	1.186	
2.8	1.36989781						
X	0.64	0.66	0.64	0.63	0.62	0.638	1.36989781
Y	0.1	0.08	0.07	0.06	0.06	0.074	
Z	1.2	1.2	1.23	1.21	1.21	1.21	

Nº GPS						B eje (μ T)	Módulo (μ T)
2.9	0.82716866						
X	0.14	0.1	0.1	0.1	0.1	0.108	0.82716866
Y	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.012	
Z	0.77	0.82	0.83	0.84	0.84	0.82	
2.10	0.45306141						
X	0.07	0.07	0.08	0.08	0.08	0.076	0.45306141
Y	0.07	0.07	0.07	0.07	0.08	0.072	
Z	0.5	0.054	0.55	0.55	0.55	0.4408	
3	2.03790677					Total eje	Módulo
X	2.01	2.04	2.04	2.04	2.03	2.032	2.03790677
Y	0	0.03	0.03	0.02	0.01	0.018	
Z	0.18	0.15	0.17	0.15	0.12	0.154	
3.1	1.96474324						
X	1.85	1.85	1.83	1.85	1.87	1.85	1.96474324
Y	0.4	0.39	0.37	0.4	0.42	0.396	
Z	0.54	0.53	0.51	0.54	0.53	0.53	
3.2	1.6842767						
X	1.18	1.16	1.15	1.16	1.16	1.162	1.6842767
Y	0.68	0.67	0.67	0.68	0.7	0.68	
Z	1.01	1.01	0.99	1.04	1.01	1.012	
3.3	1.19384589						
X	0.62	0.65	0.63	0.65	0.65	0.64	1.19384589
Y	0.34	0.34	0.34	0.34	0.35	0.342	
Z	0.95	0.95	0.94	0.94	0.96	0.948	
3.4	IMPOSIBILIDAD DE ACCESO						
X							
Y							
Z							

Nº GPS						B eje (μ T)	Módulo (μ T)
3.5	IMPOSIBILIDAD DE ACCESO						
X							
Y							
Z							
3.6	1.96854261						
X	1.77	1.75	1.67	1.65	1.69	1.706	1.96854261
Y	0.02	0.02	0.02	0.01	0.03	0.02	
Z	1.02	0.97	0.98	0.97	0.97	0.982	
3.7	1.64568041						
X	1.24	1.24	1.26	1.28	1.29	1.262	1.64568041
Y	0.02	0.03	0.02	0.03	0.01	0.022	
Z	1.07	1.07	1.06	1.04	1.04	1.056	
3.8	1.31059986						
X	0.65	0.68	0.69	0.73	0.7	0.69	1.31059986
Y	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.024	
Z	1.11	1.1	1.11	1.13	1.12	1.114	
3.9	0.87400229						
X	0.2	0.21	0.21	0.21	0.22	0.21	0.87400229
Y	0.01	0.02	0.03	0.03	0.04	0.026	
Z	0.85	0.85	0.84	0.85	0.85	0.848	
3.10	0.55380863						
X	0.04	0.04	0.05	0.04	0.05	0.044	0.55380863
Y	0	0.01	0.01	0.01	0.01	0.008	
Z	0.56	0.55	0.55	0.55	0.55	0.552	
4	2.00516633						
X	2	2	2.01	2	2	2.002	2.00516633
Y	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.012	
Z	0.08	0.13	0.12	0.13	0.1	0.112	

Nº GPS						B eje (μ T)	Módulo (μ T)
4.1	1.95843509						
X	1.82	1.81	1.82	1.8	1.8	1.81	1.95843509
Y	0.25	0.25	0.25	0.25	0.29	0.258	
Z	0.74	0.74	0.71	0.66	0.66	0.702	
4.2	1.55180153						
X	1.14	1.13	1.18	1.19	1.19	1.166	1.55180153
Y	0.32	0.32	0.31	0.32	0.31	0.316	
Z	1.03	0.96	0.97	0.97	0.94	0.974	
4.3	1.36718836						
X	0.5	0.79	0.54	0.5	0.48	0.562	1.36718836
Y	0.43	0.44	0.42	0.42	0.41	0.424	
Z	1.16	1.18	1.16	1.17	1.19	1.172	
4.4	1.00558043						
X	0.35	0.35	0.36	0.36	0.36	0.356	1.00558043
Y	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	
Z	0.93	0.93	0.93	0.94	0.94	0.934	
4.5	IMPOSIBILIDAD DE ACCESO						
X							
Y							
Z							
4.6	1.95296083						
X	1.72	1.71	1.72	1.68	1.7	1.706	1.95296083
Y	0.15	0.2	0.23	0.23	0.22	0.206	
Z	0.91	0.9	0.92	0.95	0.96	0.928	
4.7	1.61350054						
X	1.1	1.08	1.12	1.1	1.11	1.102	1.61350054
Y	0.02	0.02	0.04	0.03	0.07	0.036	
Z	1.18	1.18	1.17	1.19	1.17	1.178	

Nº GPS						B eje (μ T)	Módulo (μ T)
4.8	1.24870012						
X	0.57	0.56	0.54	0.54	0.55	0.552	1.24870012
Y	0.06	0.07	0.07	0.07	0.07	0.068	
Z	1.11	1.12	1.12	1.12	1.12	1.118	
4.9	IMPOSIBILIDAD DE ACCESO						
X							
Y							
Z							
4.10	IMPOSIBILIDAD DE ACCESO						
X							
Y							
Z							
5	1.96331353						
X	1.94	1.95	1.95	1.95	1.96	1.95	1.96331353
Y	0.15	0.2	0.22	0.21	0.22	0.2	
Z	0.11	0.11	0.12	0.11	0.1	0.11	
5.1	1.99515613						
X	1.8	1.81	1.81	1.8	1.82	1.808	1.99515613
Y	0.54	0.54	0.86	0.57	0.6	0.622	
Z	0.57	0.57	0.56	0.58	0.57	0.57	
5.2	1.70125366						
X	1.27	1.3	1.32	1.32	1.33	1.308	1.70125366
Y	0.35	0.34	0.34	0.35	0.37	0.35	
Z	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	
5.3	1.38683092						
X	0.47	0.49	0.51	0.52	0.53	0.504	1.38683092
Y	0.09	0.07	0.06	0.07	0.07	0.072	
Z	1.29	1.28	1.3	1.29	1.29	1.29	

Nº GPS						B eje (μ T)	Módulo (μ T)
5.4	0.98547856						
X	0.1	0.1	0.1	0.11	0.09	0.1	0.98547856
Y	0.11	0.12	0.13	0.14	0.14	0.128	
Z	0.98	0.97	0.97	0.97	0.97	0.972	
5.5	IMPOSIBILIDAD DE ACCESO						
X							
Y							
Z							
5.6	1.95826147						
X	1.98	1.97	1.96	1.94	1.92	1.954	1.95826147
Y	0.13	0.11	0.13	0.13	0.12	0.124	
Z	0.08	0	0.03	0.01	0.06	0.036	
5.7	1.83866691						
X	1.65	1.62	1.63	1.63	1.64	1.634	1.83866691
Y	0.23	0.22	0.2	0.18	0.19	0.204	
Z	0.81	0.83	0.81	0.83	0.81	0.818	
5.8	1.19759927						
X	0.7	0.7	0.72	0.71	0.71	0.708	1.19759927
Y	0.1	0.15	0.15	0.14	0.15	0.138	
Z	0.95	0.96	0.95	0.96	0.96	0.956	
5.9	0.86772346						
X	0.32	0.33	0.3	0.3	0.29	0.308	0.86772346
Y	0.11	0.1	0.11	0.11	0.11	0.108	
Z	0.8	0.8	0.8	0.81	0.81	0.804	
5.10	0.59155727						
X	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.048	0.59155727
Y	0.11	0.11	0.11	0.1	0.1	0.106	
Z	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	

Nº GPS						B eje (μ T)	Módulo (μ T)
6	2.02371045						
X	2.03	2.02	2.02	2.01	2.01	2.018	2.02371045
Y	0.05	0.05	0.04	0.04	0.03	0.042	
Z	0.15	0.14	0.15	0.15	0.14	0.146	
6.1	1.95551425						
X	1.85	1.89	1.88	1.87	1.87	1.872	1.95551425
Y	0.13	0.14	0.16	0.17	0.17	0.154	
Z	0.54	0.54	0.53	0.55	0.56	0.544	
6.2	1.74152462						
X	1.25	1.24	1.25	1.25	1.24	1.246	1.74152462
Y	0.23	0.23	0.24	0.24	0.23	0.234	
Z	1.19	1.18	1.21	1.2	1.19	1.194	
6.3	1.50276811						
X	0.67	0.67	0.67	0.65	0.65	0.662	1.50276811
Y	0.28	0.29	0.29	0.29	0.29	0.288	
Z	1.31	1.32	1.32	1.32	1.32	1.318	
6.4	0.96899536						
X	0.12	0.11	0.11	0.11	0.12	0.114	0.96899536
Y	0.06	0.06	0.07	0.07	0.07	0.066	
Z	0.95	0.96	0.96	0.96	0.97	0.96	
6.5	IMPOSIBILIDAD DE ACCESO						
X							
Y							
Z							
6.6	1.68731029						
X	1.54	1.56	1.58	1.6	1.61	1.578	1.68731029
Y	0.06	0.06	0.07	0.06	0.07	0.064	
Z	0.61	0.61	0.59	0.59	0.57	0.594	

Nº GPS						B eje (μ T)	Módulo (μ T)
6.7	1.43713326						
X	1.02	1.01	1.01	1.03	1.01	1.016	1.43713326
Y	0.12	0.12	0.12	0.11	0.1	0.114	
Z	1.01	1.02	1.01	1	1.01	1.01	
6.8	1.18028641						
X	0.66	0.65	0.67	0.67	0.67	0.664	1.18028641
Y	0.11	0.11	0.1	0.09	0.02	0.086	
Z	0.97	0.97	0.98	0.97	0.97	0.972	
6.9	0.81214284						
X	0.17	0.17	0.15	0.17	0.16	0.164	0.81214284
Y	0.13	0.13	0.12	0.12	0.11	0.122	
Z	0.79	0.79	0.78	0.78	0.79	0.786	
6.10	0.55327751						
X	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.55327751
Y	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	
Z	0.55	0.55	0.55	0.54	0.54	0.546	
7							
X	2.06	2.06	2.07	2.05	2.06	2.06	2.06166632
Y	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.012	
Z	0.08	0.08	0.08	0.09	0.08	0.082	
7.1	2.03869076						
X	1.87	1.87	1.84	1.87	1.87	1.864	2.03869076
Y	0.17	0.16	0.17	0.19	0.16	0.17	
Z	0.84	0.82	0.81	0.78	0.79	0.808	
7.2	1.84533249						
X	1.27	1.29	1.3	1.3	1.28	1.288	1.84533249
Y	0.29	0.26	0.23	0.23	0.23	0.248	
Z	1.29	1.31	1.29	1.3	1.3	1.298	

Nº GPS						B eje (μ T)	Módulo (μ T)
7.3	1.47635903						
X	0.58	0.58	0.53	0.56	0.57	0.564	1.47635903
Y	0.16	0.18	0.17	0.17	0.16	0.168	
Z	1.34	1.36	1.38	1.35	1.34	1.354	
7.4	0.98948674						
X	0.1	0.1	0.09	0.1	0.1	0.098	0.98948674
Y	0.1	0.11	0.12	0.12	0.12	0.114	
Z	0.97	0.98	0.98	0.98	0.98	0.978	
7.5	IMPOSIBILIDAD DE ACCESO						
X							
Y							
Z							
7.6	1.83258179						
X	1.68	1.68	1.7	1.69	1.73	1.696	1.83258179
Y	0.15	0.17	0.16	0.15	0.16	0.158	
Z	0.71	0.67	0.68	0.65	0.67	0.676	
7.7	1.4443753						
X	1.07	1.08	1.07	1.06	1.05	1.066	1.4443753
Y	0.26	0.26	0.26	0.24	0.23	0.25	
Z	0.94	0.94	0.94	0.95	0.94	0.942	
7.8	1.21973932						
X	0.64	0.63	0.64	0.65	0.65	0.642	1.21973932
Y	0.25	0.25	0.24	0.24	0.24	0.244	
Z	1.01	1.01	1.01	1	1.01	1.008	
7.9	0.84445722						
X	0.26	0.25	0.25	0.25	0.25	0.252	0.84445722
Y	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	
Z	0.8	0.81	0.8	0.8	0.8	0.802	

Nº GPS						B eje (μ T)	Módulo (μ T)
7.10	0.62454463						
X	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.042	0.62454463
Y	0.09	0.1	0.1	0.09	0.09	0.094	
Z	0.62	0.62	0.62	0.61	0.61	0.616	
8	2.43248433						
X	2.8	2.34	2.33	2.33	2.34	2.428	2.43248433
Y	0.09	0.08	0.1	0.08	0.08	0.086	
Z	0.11	0.1	0.16	0.09	0.14	0.12	
8.1	2.25515144						
X	2.01	2.09	2.03	2.05	2.03	2.042	2.25515144
Y	0.2	0.19	0.18	0.18	0.2	0.19	
Z	0.88	0.89	0.98	0.93	1.01	0.938	
8.2	1.91029003						
X	1.1	0.96	1.01	1	1.06	1.026	1.91029003
Y	0.24	0.23	0.24	0.23	0.24	0.236	
Z	1.58	1.59	1.59	1.6	1.61	1.594	
8.3	1.66227555						
X	0.5	0.52	0.56	0.55	0.57	0.54	1.66227555
Y	0.24	0.23	0.25	0.23	0.24	0.238	
Z	1.55	1.56	1.55	1.55	1.56	1.554	
8.4	0.98948674						
X	0.1	0.1	0.09	0.1	0.1	0.098	0.98948674
Y	0.1	0.11	0.12	0.12	0.12	0.114	
Z	0.97	0.98	0.98	0.98	0.98	0.978	
8.5	IMPOSIBILIDAD DE ACCESO						
X							
Y							
Z							

Nº GPS						B eje (μ T)	Módulo (μ T)
8.6	2.21797836						
X	2.03	2.06	2.07	2.07	2.06	2.058	2.21797836
Y	0.12	0.11	0.12	0.09	0.1	0.108	
Z	0.82	0.8	0.81	0.83	0.84	0.82	
8.7	1.66399159						
X	1.17	1.21	1.18	1.18	1.24	1.196	1.66399159
Y	0.09	0.06	0.03	0.03	0.02	0.046	
Z	1.16	1.14	1.17	1.16	1.15	1.156	
8.8	1.37681662						
X	0.8	0.77	0.8	0.8	0.75	0.784	1.37681662
Y	0.28	0.27	0.25	0.25	0.24	0.258	
Z	1.1	1.09	1.1	1.12	1.1	1.102	
8.9	0.93282153						
X	0.23	0.22	0.22	0.23	0.23	0.226	0.93282153
Y	0.09	0.08	0.07	0.07	0.06	0.074	
Z	0.9	0.9	0.9	0.91	0.9	0.902	
8.10	0.66659133						
X	0.07	0.06	0.06	0.05	0.05	0.058	0.66659133
Y	0.12	0.12	0.13	0.13	0.13	0.126	
Z	0.65	0.65	0.65	0.65	0.66	0.652	

ANEXO III: Registro de medidas de la inducción magnética en cada eje para cada ubicación en la muestra de ubicaciones aleatorias.

Nº GPS						B eje (μ T)	Módulo (μ T)
102	0.06959885						
X	0.06	0.05	0.07	0.07	0.06	0.062	0.06959885
Y	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	
Z	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	
103	0.04774935						
X	0.04	0.05	0.04	0.04	0.06	0.046	0.04774935
Y	0.01	0	0.01	0.01	0.01	0.008	
Z	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	
104	0.07367496						
X	0.01	0	0	0.1	0.1	0.042	0.07367496
Y	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	
Z	0.01	0.01	0.01	0	0.01	0.008	
105	0.06241795						
X	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.014	0.06241795
Y	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	
Z	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	
106	0.1775162						
X	0.15	0.14	0.14	0.14	0.16	0.146	0.1775162
Y	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.014	
Z	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	
107	0.19486406						
X	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19486406
Y	0.04	0.04	0.03	0.03	0.04	0.036	
Z	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.024	
108	0.14156271						
X	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.14156271
Y	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.016	
Z	0.12	0.12	0.12	0.13	0.12	0.122	
109	0.25676448						
X	0.25	0.25	0.25	0.26	0.26	0.254	0.25676448
Y	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.016	
Z	0.03	0.03	0.04	0.04	0.03	0.034	

Nº GPS						B eje (μ T)	Módulo (μ T)
110	0.22458851						
X	0.11	0.1	0.1	0.1	0.1	0.102	0.22458851
Y	0.01	0.01	0	0.01	0	0.006	
Z	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	
111	0.39073776						
X	0.36	0.36	0.37	0.36	0.38	0.366	0.39073776
Y	0.03	0.04	0.04	0.04	0.03	0.036	
Z	0.13	0.14	0.12	0.13	0.14	0.132	
112	0.08910668						
X	0.09	0.08	0.08	0.08	0.09	0.084	0.08910668
Y	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	
Z	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.028	
113	0.14082613						
X	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.14082613
Y	0	0	0.01	0.01	0	0.004	
Z	0.05	0.05	0.06	0.06	0.05	0.054	
114	0.26756652						
X	0.24	0.024	0.23	0.23	0.24	0.1928	0.26756652
Y	0.04	0.04	0.03	0.04	0.03	0.036	
Z	0.18	0.17	0.17	0.19	0.2	0.182	
115	0.24636039						
X	0.26	0.024	0.25	0.25	0.26	0.2088	0.24636039
Y	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.014	
Z	0.06	0.27	0.26	0.03	0.03	0.13	
116	0.55348351						
X	0.19	0.18	0.18	0.19	0.18	0.184	0.55348351
Y	0	0	0	0.01	0	0.002	
Z	0.52	0.52	0.52	0.52	0.53	0.522	
117	0.90848665						
X	0.26	0.24	0.25	0.23	0.24	0.244	0.90848665
Y	0.04	0.05	0.04	0.05	0.04	0.044	
Z	0.87	0.87	0.88	0.88	0.87	0.874	
118	1.23153887						
X	1.05	1.07	1.06	1.06	1.8	1.208	1.23153887
Y	0.14	0.13	0.13	0.13	0.13	0.132	
Z	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	

Nº GPS						B eje (μ T)	Módulo (μ T)
110	0.22458851						
X	0.64	0.61	0.6	0.62	0.62	0.618	0.90554072
Y	0.1	0.08	0.09	0.09	0.08	0.088	
Z	0.66	0.65	0.65	0.66	0.66	0.656	
120	0.54523756						
X	0.2	0.16	0.14	0.14	0.14	0.156	0.54523756
Y	0.06	0.07	0.07	0.07	0.07	0.068	
Z	0.52	0.51	0.52	0.52	0.52	0.518	
121	0.80365167						
X	0.07	0.07	0.07	0.08	0.07	0.072	0.80365167
Y	0.08	0.08	0.1	0.08	0.08	0.084	
Z	0.79	0.79	0.8	0.8	0.8	0.796	
122	1.29710293						
X	1.3	1.3	1.28	1.29	1.28	1.29	1.29710293
Y	0.12	0.14	0.12	0.14	0.11	0.126	
Z	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	
123	0.91158104						
X	0.4	0.48	0.45	0.45	0.41	0.438	0.91158104
Y	0.24	0.28	0.28	0.25	0.25	0.26	
Z	0.77	0.77	0.77	0.7	0.77	0.756	
124	0.5099647						
X	0.16	0.14	0.15	0.15	0.14	0.148	0.5099647
Y	0	0	0.01	0	0.01	0.004	
Z	0.48	0.48	0.49	0.49	0.5	0.488	
125	0.27423348						
X	0.15	0.14	0.15	0.15	0.15	0.148	0.27423348
Y	0.03	0.02	0.01	0.01	0.03	0.02	
Z	0.23	0.24	0.23	0.22	0.23	0.23	
126	0.27423348						
X	0.14	0.15	0.15	0.15	0.15	0.148	0.27423348
Y	0.01	0.02	0.03	0.03	0.01	0.02	
Z	0.24	0.23	0.22	0.23	0.23	0.23	
127	0.95850926						
X	0.68	0.71	0.7	0.71	0.7	0.7	0.95850926
Y	0.22	0.25	0.26	0.26	0.25	0.248	
Z	0.62	0.6	0.61	0.6	0.6	0.606	

Nº GPS						B eje (μ T)	Módulo (μ T)
110	0.22458851						
X	0.27	0.3	0.31	0.3	0.3	0.296	0.62513039
Y	0.16	0.14	0.12	0.11	0.1	0.126	
Z	0.54	0.54	0.55	0.53	0.52	0.536	
129	0.39418777						
X	0.07	0.08	0.09	0.08	0.07	0.078	0.3731702
Y	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	
Z	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	

ANEXO IV: Coordenadas geográficas de cada ubicación de medida, inducción magnética resultante en cada eje y módulo total e intensidad de corriente en la línea según hora de medida.

GPS	COORD_X (m)	COORD_Y (m)	COORD_Z (m)	Nº PUNTO	HORA (h_min)	A_MONTES1 (A)	A_MONTES2 (A)	MODULO (μ T)	CM_5X5 MDT5 (μ T)	CM_10X10 MDT5 (μ T)	CM_25X25 MDT25 (μ T)
13	375764.177	4066010.042	90.300	3_0	10_20	127.80	132.70	2.038	2.000	1.814	1.431
14	375762.814	4066011.557	90.200	3_1	10_27	127.80	132.70	1.965	1.938	1.754	1.426
15	375766.216	4066008.086	90.100	3_6	10_37	127.80	132.70	1.969	1.906	1.773	1.406
16	375768.174	4066006.463	89.800	3_7	10_39	127.80	132.70	1.646	1.713	1.608	1.350
17	375769.560	4066004.560	89.100	3_8	10_42	127.80	132.70	1.311	1.452	1.427	1.260
18	375773.320	4066001.083	88.200	3_9	10_43	127.80	132.70	0.874	0.936	0.993	0.979
19	375776.877	4065997.907	87.100	3_10	10_44	127.80	132.70	0.554	0.646	0.673	0.773
20	375761.129	4066013.451	89.800	3_2	10_30	127.80	132.70	1.684	1.622	1.612	1.390
21	375759.133	4066015.399	88.300	3_3	10_32	127.80	132.70	1.194	1.277	1.328	1.307
23	375758.954	4066008.170	90.500	2_1	10_50	127.80	132.70	2.088	1.693	1.754	1.408
25	375764.697	4066002.838	89.600	2_7	10_52	127.80	132.70	1.652	1.698	1.567	1.326
30	375755.183	4066004.790	90.500	1_1	10_58	127.80	132.70	1.875	1.517	1.410	1.526
31	375759.252	4066001.442	90.700	1_6	11_01	128.80	133.70	1.896	1.856	1.653	1.498
33	375754.871	4065999.722	90.000	0_0	11_10	128.80	133.70	1.921	0.000	0.000	0.000
34	375761.028	4066006.701	89.800	2_0	10_47	127.80	132.70	2.116	1.905	1.896	1.414
35	375762.673	4066005.012	89.600	2_6	10_51	127.80	132.70	1.976	1.976	1.763	1.393
37	375766.663	4066000.983	88.800	2_8	10_52	127.80	132.70	1.370	1.407	1.360	1.222
38	375769.517	4065998.638	88.400	2_9	10_53	127.80	132.70	0.827	1.043	1.034	1.047
39	375773.220	4065995.462	87.300	2_10	10_54	127.80	132.70	0.453	0.689	0.723	0.834
47	375757.614	4066003.047	90.100	1_0	10_57	127.80	132.70	1.991	1.835	1.587	1.521

GPS	COORD_X (m)	COORD_Y (m)	COORD_Z (m)	Nº PUNTO	HORA (h_min)	A_MONTES1 (A)	A_MONTES2 (A)	MODULO (µT)	CM_5X5 MDT5 (µT)	CM_10X10 MDT5 (µT)	CM_25X25 MDT25 (µT)
49	375760.875	4065999.422	89.900	1_7	11_03	128.80	133.70	1.728	1.664	1.649	1.378
50	375763.068	4065997.744	89.800	1_8	11_05	128.80	133.70	1.447	1.391	1.399	1.241
52	375767.834	4066013.925	90.400	4_0	11_19	128.80	133.70	2.005	2.045	1.781	1.591
53	375766.540	4066015.646	90.700	4_1	11_20	128.80	133.70	1.958	1.953	1.724	1.595
54	375765.179	4066017.101	89.900	4_2	11_21	128.80	133.70	1.552	1.744	1.619	1.568
55	375763.397	4066018.850	89.300	4_3	11_23	128.80	133.70	1.367	1.453	1.416	1.499
56	375761.178	4066021.259	88.300	4_4	11_25	128.80	133.70	1.006	1.086	1.099	1.366
57	375769.377	4066012.443	90.500	4_6	11_34	128.80	133.70	1.953	1.940	1.793	1.579
58	375771.274	4066009.974	89.600	4_7	11_36	128.80	133.70	1.614	1.691	1.679	1.498
59	375773.145	4066007.393	88.500	4_8	11_38	128.80	133.70	1.249	1.344	1.396	1.361
60	375771.380	4066017.218	89.900	5_0	11_42	128.80	133.70	1.963	1.962	1.967	1.865
61	375769.706	4066018.702	90.200	5_1	11_45	128.80	133.70	1.995	1.924	1.960	1.847
62	375768.381	4066019.983	90.200	5_2	11_56	128.80	133.70	1.701	1.830	1.776	1.818
63	375766.495	4066021.512	89.800	5_3	11_56	128.80	133.70	1.387	1.562	1.532	1.739
64	375763.029	4066023.923	88.800	5_4	11_57	128.80	133.70	0.985	1.045	1.110	1.511
65	375773.309	4066015.786	89.700	5_6	11_59	128.80	133.70	1.958	1.883	1.785	1.870
66	375774.924	4066014.133	89.200	5_7	12_00	127.20	132.40	1.839	1.640	1.600	1.820
67	375777.148	4066012.478	87.900	5_8	12_01	127.20	132.40	1.198	1.334	1.360	1.756
68	375780.705	4066010.500	87.300	5_9	12_03	127.20	132.40	0.868	0.968	0.982	1.500
69	375784.656	4066007.875	86.200	5_10	12_05	127.20	132.40	0.592	0.680	0.704	1.133
70	375774.826	4066020.702	90.100	6_0	12_10	127.20	132.40	2.024	1.985	1.829	2.268
71	375773.361	4066022.284	90.300	6_1	12_1	127.20	132.40	1.956	1.998	1.837	2.268
72	375772.104	4066023.805	90.300	6_2	12_11	127.20	132.40	1.742	1.889	1.785	2.258
73	375770.252	4066025.657	89.900	6_3	12_13	127.20	132.40	1.503	1.617	1.611	2.188
74	375767.276	4066028.634	88.800	6_4	12_14	127.20	132.40	0.969	1.124	1.199	1.789

GPS	COORD_X (m)	COORD_Y (m)	COORD_Z (m)	Nº PUNTO	HORA (h_min)	A_MONTES1 (A)	A_MONTES2 (A)	MODULO (µT)	CM_5X5 MDT5 (µT)	CM_10X10 MDT5 (µT)	CM_25X25 MDT25 (µT)
75	375776.669	4066019.109	89.800	6_6	12_16	127.20	132.40	1.687	1.821	1.734	2.265
76	375778.454	4066017.389	89.400	6_7	12_25	127.20	132.40	1.180	1.577	1.547	2.201
77	375780.291	4066015.797	88.100	6_8	12_25	127.20	132.40	1.180	1.312	1.339	1.954
78	375786.987	4066009.393	86.200	6_10	12_28	127.20	132.40	0.553	0.646	0.680	1.140
79	375783.393	4066013.163	87.400	6_9	12_30	127.20	132.40	0.812	0.954	1.022	1.575
80	375778.093	4066024.375	90.400	7_0	12_32	127.20	132.40	2.062	2.105	1.915	2.800
81	375776.641	4066025.854	90.700	7_1	12_34	127.20	132.40	2.039	2.120	1.918	2.791
82	375775.431	4066027.264	90.700	7_2	12_35	127.20	132.40	1.845	1.991	1.875	2.611
83	375773.766	4066028.944	90.800	7_3	12_36	127.20	132.40	1.476	1.762	1.725	2.334
84	375770.682	4066032.344	89.500	7_4	12_36	127.20	132.40	0.989	1.226	1.243	1.844
85	375779.708	4066022.776	89.600	7_6	12_40	127.20	132.40	1.833	1.908	1.842	2.572
86	375781.664	4066021.195	88.500	7_7	12_41	127.20	132.40	1.444	1.646	1.653	2.297
87	375783.349	4066019.287	88.400	7_8	12_42	127.20	132.40	1.220	1.366	1.386	2.032
88	375786.993	4066016.052	87.600	7_9	12_43	127.20	132.40	0.844	0.927	0.992	1.573
89	375789.831	4066013.662	86.900	7_10	12_44	127.20	132.40	0.625	0.712	0.746	1.264
90	375793.157	4066017.092	87.600	8_10	12_47	127.20	132.40	0.667	0.734	0.756	1.254
91	375790.059	4066019.944	88.200	8_9	12_48	127.20	132.40	0.933	1.012	1.032	1.611
92	375787.750	4066022.760	88.800	8_8	12_49	127.20	132.40	1.377	1.355	1.399	1.951
93	375785.496	4066024.596	89.600	8_7	12_51	127.20	132.40	1.664	1.696	1.695	2.251
94	375783.632	4066025.998	90.900	8_6	12_54	127.20	132.40	2.218	1.979	1.936	2.506
95	375781.748	4066027.924	94.800	8_0	12_56	127.20	132.40	2.432	2.196	2.229	2.584
96	375780.075	4066029.378	91.300	8_1	12_58	127.20	132.40	2.255	2.231	2.256	2.596
97	375778.609	4066030.559	91.300	8_2	12_59	127.20	132.40	1.910	2.188	2.066	2.574
98	375776.753	4066032.220	91.600	8_3	13_00	129.10	134.20	1.662	1.899	1.809	2.321
99	375773.692	4066034.875	91.100	8_4	13_01	129.10	134.20	0.989	1.340	1.370	1.888

GPS	COORD_X (m)	COORD_Y (m)	COORD_Z (m)	Nº PUNTO	HORA (h_min)	A_MONTES1 (A)	A_MONTES2 (A)	MODULO (μ T)	CM_5X5 MDT5 (μ T)	CM_10X10 MDT5 (μ T)	CM_25X25 MDT25 (μ T)
102	375347.987	4066112.506	35.100	Aleatorio	18_02	119.40	123.80	0.070	0.043	0.043	0.045
103	375097.045	4066151.611	33.600	Aleatorio	18_06	119.40	123.80	0.048	0.051	0.051	0.055
104	375229.696	4066127.473	32.800	Aleatorio	18_10	119.40	123.80	0.074	0.063	0.063	0.067
105	375319.196	4066061.971	32.500	Aleatorio	18_12	119.40	123.80	0.062	0.080	0.081	0.094
106	375474.956	4066033.754	28.400	Aleatorio	18_15	119.40	123.80	0.178	0.226	0.226	0.259
107	375121.229	4066041.394	29.800	Aleatorio	18_17	119.40	123.80	0.195	0.278	0.273	0.299
108	374850.599	4066242.921	30.200	Aleatorio	18_21	119.40	123.80	0.142	0.193	0.193	0.220
109	375113.316	4066110.699	38.300	Aleatorio	18_23	119.40	123.80	0.257	0.355	0.344	0.491
110	374742.887	4066169.407	39.200	Aleatorio	18_27	119.40	123.80	0.225	0.309	0.312	0.406
111	375048.905	4066054.390	44.300	Aleatorio	18_30	119.40	123.80	0.391	0.497	0.476	0.543
112	375582.901	4066062.794	64.200	Aleatorio	18_32	119.40	123.80	0.089	0.106	0.108	0.128
113	375260.115	4065971.023	63.900	Aleatorio	18_40	119.40	123.80	0.141	0.148	0.152	0.194
114	375043.965	4066075.533	63.300	Aleatorio	18_45	119.40	123.80	0.268	0.282	0.290	0.306
115	374691.544	4066126.254	63.900	Aleatorio	18_47	119.40	123.80	0.246	0.378	0.398	0.610
116	375482.093	4065986.984	64.000	Aleatorio	18_55	119.40	123.80	0.553	0.568	0.597	0.885
117	375184.801	4066085.283	63.600	Aleatorio	18_59	119.40	123.80	0.908	0.931	0.921	0.949
118	375097.330	4066082.669	61.000	Aleatorio	19_00	117.10	121.70	1.232	1.155	1.174	1.044
119	375261.853	4066043.338	60.600	Aleatorio	19_03	117.10	121.70	0.906	1.118	1.052	1.187
120	374790.442	4066207.654	63.300	Aleatorio	19_05	117.10	121.70	0.545	0.548	0.568	0.605
121	375120.322	4066064.999	62.400	Aleatorio	19_08	117.10	121.70	0.804	0.903	0.897	1.171
122	374224.567	4066386.743	115.300	Aleatorio	19_10	117.10	121.70	1.297	1.155	0.989	0.965
123	374025.564	4066460.213	112.700	Aleatorio	19_11	117.10	121.70	0.912	0.895	0.886	1.047
124	374150.718	4066389.836	112.800	Aleatorio	19_15	117.10	121.70	0.510	0.489	0.511	0.709
125	374067.492	4066493.347	112.700	Aleatorio	19_18	117.10	121.70	0.274	0.280	0.286	0.404
126	374041.473	4066470.653	112.400	Aleatorio	19_18	117.10	121.70	0.274	0.276	0.284	0.398

GPS	COORD_X (m)	COORD_Y (m)	COORD_Z (m)	Nº PUNTO	HORA (h_min)	A_MONTES1 (A)	A_MONTES2 (A)	MODULO (μ T)	CM_5X5 MDT5 (μ T)	CM_10X10 MDT5 (μ T)	CM_25X25 MDT25 (μ T)
127	374041.473	4066470.653	107.800	Aleatorio	19_20	117.10	121.70	0.959	1.099	1.099	1.153
128	374179.537	4066362.979	105.000	Aleatorio	19_21	117.10	121.70	0.625	0.855	0.855	0.855
129	374251.197	4066427.182	101.700	Aleatorio	19_23	117.10	121.70	0.394	0.580	0.580	0.580