

Análisis y mitigación de la exposición electromagnética en cruces de infraestructura vial y líneas de transmisión de alta tensión: estudio aplicado de seguridad operacional

Analysis and Mitigation of Electromagnetic Exposure in Road Infrastructure Crossings with High-Voltage Transmission Lines: An Applied Study on Operational Safety

Juan David Losada-Losada¹, Darwin Fabio Marín-Yepez²

Fecha de recepción: 11 de diciembre, 2025

Fecha de aprobación: 6 d abril, 2026

Losada-Losada, J.D; Marín-Yepez, D.F. Análisis y mitigación de la exposición electromagnética en cruces de infraestructura vial y líneas de transmisión de alta tensión: estudio aplicado de seguridad operacional. *Tecnología en Marcha*. Vol. 39 N° 4. Octubre-Diciembre, 2026. Pág. 20-31.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v39i4.8385>



1 Universidad de Manizales, Colombia.

 jdlosadal@unal.edu.co

 <https://orcid.org/0000-0001-9935-9977>

2 Universidad de Manizales, Colombia.

 dmарiny@unal.edu.co

 <https://orcid.org/0000-0002-2709-361X>

Palabras clave

Campos electromagnéticos; líneas de transmisión de alta tensión; seguridad eléctrica; evaluación de exposición electromagnética; mitigación de riesgo.

Resumen

Este estudio tuvo como propósito evaluar los campos eléctricos y magnéticos generados por una línea de transmisión de 500 kV sobre un puente peatonal, verificar su cumplimiento normativo y proponer medidas de mitigación. Para ello, se emplearon las formulaciones de coeficientes de potencial de Maxwell para el cálculo del campo eléctrico y la ley de Biot-Savart para la estimación del campo magnético. El análisis consideró un haz de cuatro subconductores por fase, corrientes de 2000 A y 4083 A, así como la presencia de fenómenos de microdescargas. Los resultados indican que el campo eléctrico máximo fue de 3,12 kV/m y el campo magnético máximo alcanzó 42,24 μ T, valores que se mantienen por debajo de los límites establecidos por el RETIE y la ICNIRP. Las microdescargas, aunque perceptibles, no representan un riesgo para la salud. La proximidad entre la infraestructura vial y las líneas de transmisión hace necesario implementar acciones que reduzcan la percepción de riesgo y garanticen condiciones adecuadas de seguridad conforme a la normativa internacional. En este contexto, la coexistencia del puente y la línea de transmisión es viable siempre que se apliquen medidas de mitigación como la equipotencialización, la puesta a tierra, el aislamiento de pasamanos y el control operativo.

Keywords

Electromagnetic fields; high-voltage transmission lines; electrical safety; electromagnetic exposure assessment; risk mitigation.

Abstract

This study aimed to evaluate the electric and magnetic fields generated by a 500 kV transmission line over a pedestrian bridge, assess compliance with applicable standards, and propose mitigation measures. The analysis employed Maxwell's potential-coefficient formulations for the electric field and the Biot-Savart law for the magnetic field. A bundle of four subconductors per phase, operating currents of 2000 A and 4083 A, and the occurrence of microdischarge phenomena were considered. The maximum electric field reached 3.12 kV/m, while the maximum magnetic field was 42.24 μ T, both remaining below the limits established by RETIE and ICNIRP. Although microdischarges may be perceptible, they do not pose a health risk. The close proximity between roadway infrastructure and high-voltage transmission lines underscores the need for actions that reduce perceived risk and ensure adequate safety in accordance with international regulations. Under appropriate mitigation measures—such as equipotential bonding, grounding, handrail insulation, and operational control—the coexistence of the pedestrian bridge and the transmission line is considered technically feasible.

Introducción

La coexistencia de infraestructura vial y sistemas de transmisión eléctrica de extra alta tensión (EHV) plantea desafíos significativos en términos de seguridad vial, continuidad urbana y exposición a campos electromagnéticos (CEM) de frecuencia industrial (50/60 Hz). Estas interacciones requieren evaluaciones técnicas rigurosas para garantizar el cumplimiento

normativo y la aceptación social, dado que los campos eléctricos y magnéticos generados por las líneas de transmisión influyen tanto en la percepción del riesgo como en la seguridad de los usuarios [1]–[5].

La radiación electromagnética se clasifica en ionizante y no ionizante, siendo esta última la asociada a los sistemas eléctricos de potencia. A diferencia de la ionizante, que puede producir daños biológicos al inducir ionización, la radiación no ionizante carece de energía suficiente para alterar la estructura atómica de los materiales, aunque su exposición prolongada genera inquietud social y científica [6],[7].

Diversos estudios han analizado la exposición de poblaciones cercanas a líneas de transmisión, evaluando no solo el impacto en la salud humana, sino también en fauna y flora [8]–[12]. En particular, Ahmadi et al. [13] señalan que, si bien los riesgos para residentes alejados son mínimos, la permanencia prolongada bajo la línea sí constituye un factor crítico. Asimismo, se ha identificado que la altura del conductor es determinante en la mitigación del campo eléctrico a nivel del suelo [14].

Otros trabajos han abordado el riesgo desde la perspectiva de la infraestructura eléctrica. Rezaian [15] propone medidas para reducir riesgos en zonas residenciales próximas a líneas de alta tensión, mientras que Hu et al. [16] analizan la confiabilidad del sistema considerando condiciones climáticas extremas y el factor humano.

En este contexto, el proyecto Autopista Conexión Pacífico Tres, enmarcado en el Plan Nacional de Desarrollo (PND) 2010–2014, introdujo una reconfiguración vial que conectó los municipios de La Felisa y La Manuela (Caldas, Colombia), específicamente en el sector K14+070. Esta intervención fragmentó la conectividad urbana, generando dos márgenes sin un cruce peatonal seguro y exponiendo a la comunidad a flujos vehiculares de alta velocidad. Para restituir la movilidad peatonal y garantizar la seguridad, se proyectó un puente peatonal cuya ubicación coincidió con la franja de servidumbre de una línea de transmisión de 500 kV.

Desde la perspectiva de la ingeniería del riesgo, la implantación del puente reduce la probabilidad de siniestros viales, aunque introduce un nuevo riesgo eléctrico asociado a microdescargas perceptibles, técnicamente mitigables. Por ello, el presente estudio tiene como objetivo cuantificar los campos eléctricos y magnéticos en el emplazamiento del puente, verificar su conformidad con los límites del RETIE [1] y las directrices ICNIRP [2], así como proponer medidas de mitigación y un plan de verificación metrológica conforme a IEEE Std 644-2019 [5].

Materiales y métodos

Datos geométricos y diseño civil

El puente peatonal etapa 1 presenta: (i) luz entre apoyos de 23,34 m y (ii) ancho libre del tablero de 2,45 m. La superestructura es una celosía tubular con tablero apoyado sobre pilas de altura variable y cimentación mediante pilotes tipo Caisson. El índice de planos del proyecto (K14+070) consigna localización, perfiles, geometría de apoyos y detalles de losas y rampas.

Cuadro 1. Geometría estructural relevante para el acoplamiento EM.

Parámetro	Valor
Luz entre apoyo (Etapa 1)	23,34 m
Ancho libre del tablero	2,45 m
Ubicación (Abscisa vial)	K14 + 070
Superestructura	Celosía tubular
Cimentación	Pilotes tipo Caisson (1.40 m, típico)
Planos (Códigos ejemplo)	K14 + 070- P1..P7 (Planta, perfil, secciones y detalles)

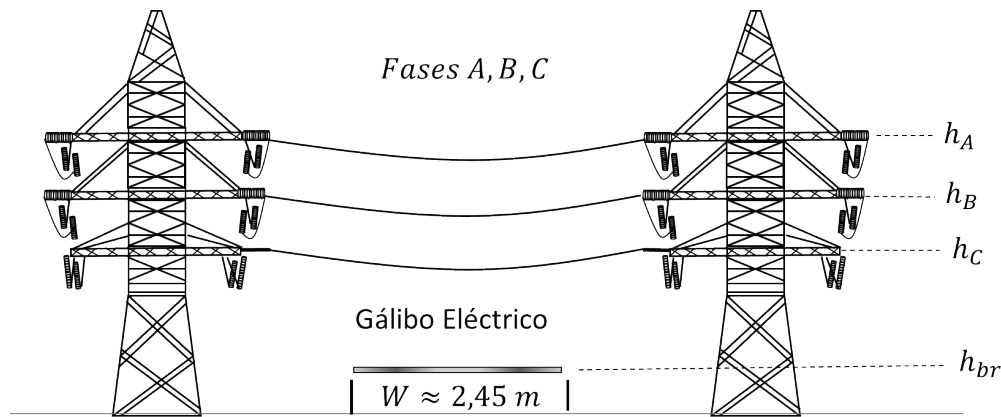


Figura 1. Esquema no a escala del cruce LT 500 kV – puente peatonal. Se indican alturas de fase h_A , h_B , h_C y altura de tablero h_{br} , gálibo eléctrico G y ancho de tablero W .

Marco normativo

La evaluación de los campos eléctricos y magnéticos en entornos con líneas de transmisión de extra alta tensión se fundamenta en el cumplimiento de normativas nacionales e internacionales. En Colombia, el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETI) establece límites de exposición tanto para el público como para el personal ocupacionalmente expuesto. Para el público en general, los valores máximos permitidos son $E \leq 4,16$ kV/m y $B \leq 200$ μ T, mientras que para personal ocupacional los límites se amplían a $E \leq 8,3$ kV/m y $B \leq 1000$ μ T, considerando la medición a una altura de un metro sobre el nivel del suelo como criterio estándar.

Como referencia internacional, se adoptan los lineamientos de la Comisión Internacional para la Protección contra Radiaciones no Ionizantes (ICNIRP) para campos eléctricos y magnéticos de baja frecuencia (LF), asociados a la frecuencia industrial de 50/60 Hz. Dichos lineamientos proporcionan criterios de seguridad reconocidos globalmente y orientados a la protección de la salud pública frente a exposiciones prolongadas.

En cuanto a la metodología de medición, se establece que los procedimientos deben ajustarse a lo indicado en la norma IEEE Std 644-2019, la cual define prácticas recomendadas para la medición de campos eléctricos y magnéticos en líneas de transmisión de 50/60 Hz. Esta norma especifica consideraciones sobre la instrumentación, el posicionamiento de los sensores, las condiciones ambientales y la incertidumbre asociada a las mediciones, con el fin de garantizar resultados precisos y trazables.

Campo eléctrico: Coeficientes de potencial de Maxwell

En el análisis de líneas de transmisión de alta y extra alta tensión, el cálculo del campo eléctrico en las proximidades de los conductores se basa en el concepto de coeficientes de potencial de Maxwell, aplicando el método de imágenes para considerar la presencia del plano conductor (tierra ideal) [17].

Cada subconductor se modela a una altura h_i sobre el plano conductor, y para N hilos (considerando los reales y sus imágenes) el potencial en el conductor i se expresa como:

$$V_i = \sum_{j=1}^n P_{ij} q_j \quad (1)$$

Donde:

V_i es el potencial del conductor

q_j es la carga lineal del conductor

P_{ij} son los coeficientes de potencial, que dependen de la geometría de los conductores y su ubicación.

Los coeficientes se calculan como:

$$P_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln \frac{2h_i}{r_i}, & i = j \\ \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln \frac{D'_{ij}}{D_{ij}}, & i \neq j \end{cases} \quad (2)$$

Donde:

ϵ es la permeabilidad del medio

h_i es la altura del conductor i respecto al plano de tierra

r_i es el radio del conductor

D_{ij} es la distancia horizontal entre los conductores i y j

D'_{ij} es la distancia entre el conductor i y la imagen del conductor j (en el plano tierra).

Una vez resuelto $\mathbf{q} = \mathbf{P}^{-1}\mathbf{V}$, el potencial en (x,y) se obtiene por superposición y el campo eléctrico se determina como: $\mathbf{E} = -\nabla\phi$. El radio equivalente (GMR) de un haz de n subconductores de radio r y espaciado d se aproxima por $GMR_{haz} = rd^{(n-1)/n}$. Este parámetro es fundamental en el cálculo de impedancia y campo eléctrico, pues refleja el efecto combinado del haz como un conductor equivalente.

Campo magnético: superposición de corrientes

El campo magnético generado por líneas de transmisión se modela a partir de la ley de Biot-Savart, la cual describe la contribución de cada elemento de corriente a un punto en el espacio. Para conductores rectilíneos de longitud infinita que transportan una corriente alterna de magnitud I_k , el campo magnético a una distancia ρ_k del conductor se determina mediante: [18],[19].

$$\mathbf{B}(r) = \sum_k \frac{\mu_0 I_k}{2\pi\rho_k} \hat{\phi}_k, \quad \mathbf{B} = \|\mathbf{B}\| \quad (3)$$

Donde:

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ es la permeabilidad magnética del vacío.

I_k es la corriente en el conductor k .

ρ_k es la distancia perpendicular desde el punto de evaluación hasta el conductor k .

$\hat{\phi}_k$ es el vector unitario tangencial al círculo centrado en el conductor (Dirección azimutal)

En el caso de líneas trifásicas, cada conductor contribuye con un campo magnético cuya dirección y magnitud varían en función de la posición espacial y la fase eléctrica. La superposición vectorial de estas contribuciones determina el campo magnético neto en el punto de interés.

Microdescargas: Modelo electromagnético y evaluación cuantitativa

Las microdescargas (o microchoques) ocurren cuando una persona eléctricamente aislada del suelo se encuentra inmersa en un campo eléctrico de frecuencia industrial (50/60 Hz), adquiriendo por inducción un potencial corporal que se descarga al establecer contacto con un objeto conectado a tierra. Este fenómeno es relevante en zonas cercanas a líneas de transmisión de alta tensión, especialmente bajo estructuras metálicas como puentes peatonales, debido a la interacción entre el campo eléctrico y el cuerpo humano.

El potencial corporal inducido depende de la interacción entre el campo eléctrico externo y el acoplamiento capacitivo existente entre el cuerpo humano, los conductores energizados y la tierra. Diversos estudios sobre exposición humana a campos eléctricos de frecuencia industrial indican que la capacitancia entre el cuerpo y la línea, junto con la capacitancia cuerpo-tierra, determina los niveles de voltaje inducido sobre una persona expuesta a líneas de transmisión de alta tensión. [20]-[23]

En un campo eléctrico E de 50/60 Hz, una persona eléctricamente aislada respecto de tierra adquiere por inducción un potencial corporal efectivo V_b :

$$V_b \approx \kappa E h_{ef} \quad (4)$$

Donde:

E es la intensidad del campo eléctrico (kV/m).

h_{ef} es la altura efectiva del cuerpo respecto a tierra (aprox. 1 m para una persona de pie).

κ es un coeficiente que depende de la postura, vestimenta/calzado y humedad (rango típico: 0,3 a 0,7). Este potencial se genera por la capacitancia efectiva cuerpo-tierra (C_b), que suele estar entre 100 y 200 pF.

La carga inducida es $Q = C_b V_b$ y la energía máxima liberable al tocar un objeto a tierra es:

$$\varepsilon = \frac{1}{2} C_b V_b^2 = \frac{1}{2} C_b (\kappa E h_{ef})^2 \quad (5)$$

Para el caso evaluado ($E \approx 3,12 \text{ kV/m}$, $h_{ef} \approx 1 \text{ m}$, $C_b \approx 150 \text{ pF}$) resulta $\varepsilon \approx 0,73 \text{ mJ}$ para $\kappa = 1$, el cual se encuentra dentro del rango típico para microdescargas perceptibles (0,12 a 0,26 mJ para κ entre 0,4 y 0,6), lo que confirma que pese a ser perceptible, no representa un riesgo significativo para la salud, según los criterios normativos internacionales. La intensidad de pico $i(0^+) = V_b / R_{eq}$ y la rapidez $\tau = R_{eq} C_b$ dependen de la impedancia de contacto; Debido a que se trata de una descarga capacitiva de muy baja energía, no es comparable con una electrocución, que implica contacto con baja impedancia y energía sostenida.

Resultados

La distribución transversal $B(x)$ a 1 m del suelo presenta un máximo bajo el eje del vano ($x \approx 0$) y decrece simétricamente hacia los bordes de la servidumbre. Para la corriente de operación $I = 2 \text{ kA}$ se obtiene $B_{\text{máx}} \approx 20,87 \mu\text{T}$, mientras que para la condición de emergencia térmica $I = 4083 \text{ A}$ el máximo asciende a $B_{\text{máx}} \approx 42,24 \mu\text{T}$. Ambos valores se sitúan por debajo del límite para público del RETIE/ICNIRP ($B \leq 200 \mu\text{T}$) y conservan amplio margen frente al límite ocupacional ($B \leq 1000 \mu\text{T}$). La razón de seguridad frente al criterio de público en el peor caso (emergencia) es $200/42,24 \approx 4,7$, y respecto al criterio ocupacional es $100/42,24 \approx 23,7$. En cuanto al campo eléctrico, el máximo calculado $E_{\text{máx}} \approx 3,12 \text{ kV/m}$ también cumple el límite para público $E \leq 4,16 \text{ kV/m}$, con una razón de seguridad aproximada de $4,16/3,12 \approx 1,33$. Adicionalmente, el modelo electromagnético de microdescargas predice una energía inducida de aproximadamente $0,73 \text{ mJ}$ (para un coeficiente $\kappa = 1$), considerando un campo eléctrico de $3,12 \text{ kV/m}$, una altura efectiva de 1 m y una capacitancia corporal promedio de 150 pF . Este valor corresponde a un fenómeno perceptible y molesto, pero no peligroso para las personas.

En las figuras 2 y 3 se ilustran perfiles transversales (datos sintéticos consistentes con los máximos; reemplazables por datos de simulación o campo).

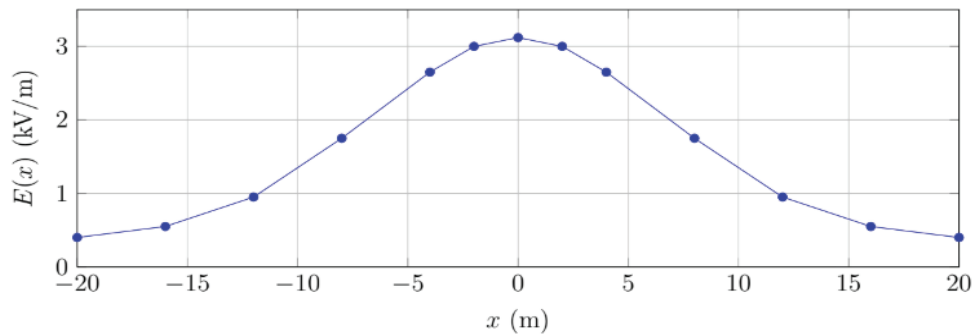


Figura 2. Perfil típico de $E(x)$ a 1 m sobre el suelo bajo el vano (sintético).

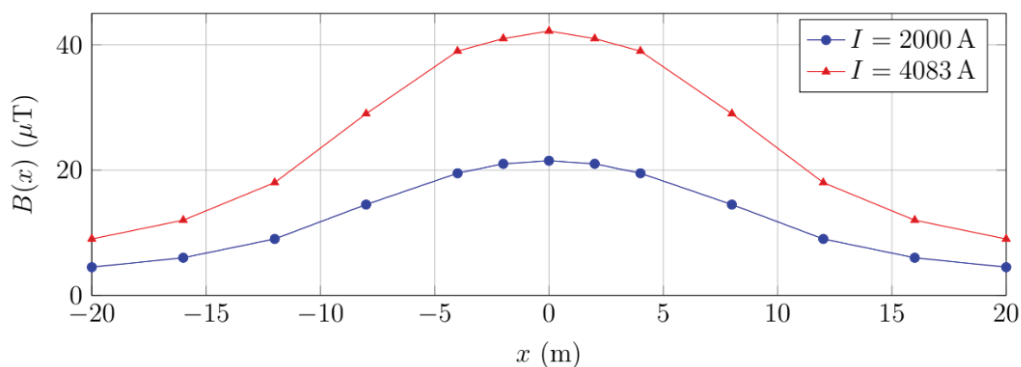


Figura 3. Perfiles de $B(x)$ a 1 m para dos niveles de corriente (sintéticos).

Adicionalmente, la evaluación de microdescargas bajo condiciones de campo eléctrico ($E \approx 3,12$ kV/m) y altura efectiva ($h_{ef} \approx 1$ m) evidencia que la energía acumulada en el cuerpo $\frac{1}{2}C_b(\kappa E h_{ef})^2$ permanece constante para valores típicos de capacitancia corporal ($C_b \approx 150$ pF) y factores $\kappa \in [0,4-1]$. Sin embargo, el pico de corriente $i(0^+) = V_b/R_{eq}$ y la constante de tiempo τ dependen significativamente del aislamiento (R_{eq}).

La figura 4 muestra que el incremento de R_{eq} en uno o más órdenes de magnitud (mediante recubrimientos dieléctricos en pasamanos) reduce el pico de corriente desde valores del orden de 10^{-1} A (condiciones sin aislamiento) hasta 10^{-4} A, mitigando la percepción de microchoques. Asimismo, la figura 5 indica que la constante de tiempo aumenta proporcionalmente a R_{eq} , pasando de $\tau \approx 15$ μ s ($R_{eq}=10^4 \Omega$) a $\tau \approx 75$ μ s ($R_{eq}=10^5 \Omega$) lo que suaviza la descarga y reduce su brusquedad. Estos resultados justifican la estrategia combinada de equipotencialización integral (reducción de gradientes y voltajes de toque) y aislamiento de pasamanos (incremento de impedancia serie). Esta mitigación es consistente con los requisitos de IEEE Std 81 para sistemas de puesta a tierra y con las recomendaciones de IEEE Std C95.3 en relación con seguridad del público.

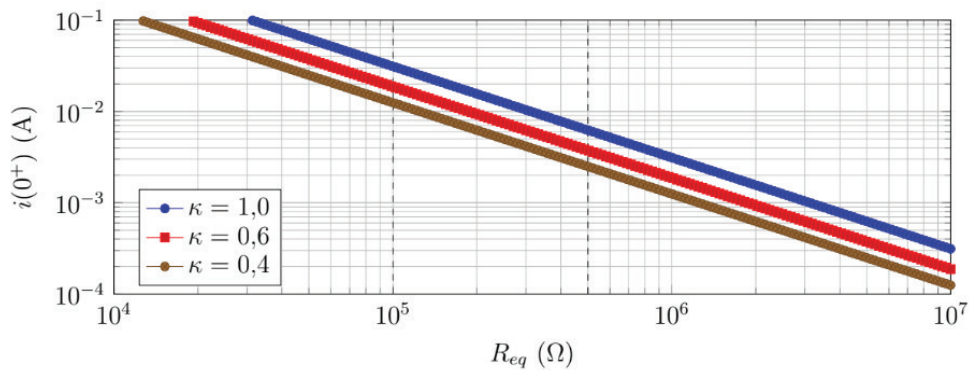


Figura 4. Pico de corriente $i(0^+) = V_b/R_{eq}$ para $E = 3,12$ kV/m, $h_{ef} = 1$ m. Aumentar R_{eq} (aislamiento de pasamanos) reduce el pico en varios órdenes.

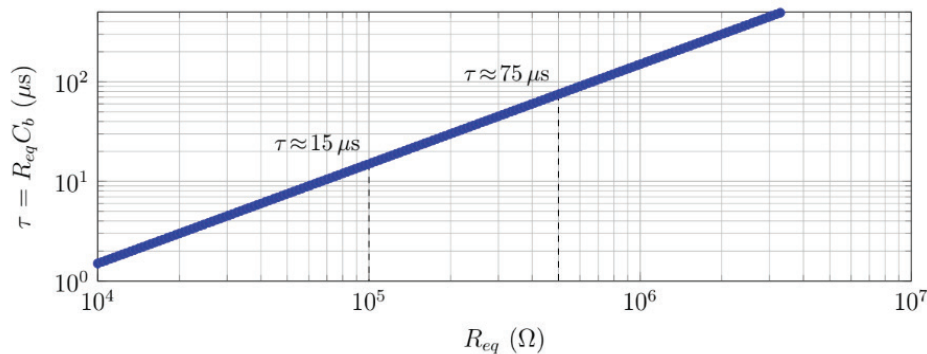


Figura 5. Constante de tiempo con $C_b = 150$ pF. El aislamiento R_{eq} (mayor) alarga la descarga y disminuye su brusquedad.

Medida de mitigación y seguridad

El objetivo principal de las medidas de mitigación es reducir la exposición del público y del personal ocupacional a campos eléctricos E y magnéticos B , así como minimizar los gradientes de potencial y garantizar la seguridad frente a descargas eléctricas. Estas estrategias se fundamentan en la relación entre la energía almacenada $\varepsilon = \frac{1}{2}C_b V_b^2$ y el modelo de potencial $V_b = \kappa E h_{ef}$, orientándose a: (i) minimizar los valores locales de campo eléctrico y gradientes de potencial, (ii) reducir el coeficiente de acoplamiento mediante equipotencialidad, (iii) incrementar la impedancia serie en contactos accesibles y (iv) garantizar una puesta a tierra efectiva que facilite el drenaje de cargas.

En la evaluación del campo magnético, la variación de $B(x)$ con respecto a la distancia mostró un valor máximo de 36.2 μT en la proximidad de la estructura, disminuyendo progresivamente con la distancia. Este valor se encuentra por debajo del límite de exposición ocupacional establecido por ICNIRP ($\approx 170 \mu T$ para 50/60 Hz), lo que representa un factor de seguridad aproximado de 4.7. Esta diferencia asegura que las medidas propuestas no solo cumplen con las normativas, sino que ofrecen un margen de seguridad considerable frente a variaciones operativas y condiciones ambientales adversas.

Con base en los resultados obtenidos y en los requerimientos de normas internacionales (RETIE, ICNIRP, IEEE 81, IEC 61786-2), se establecen las siguientes medidas de mitigación y control:

1. Equipotencialización integral

Se implementa la conexión equipotencial de barandas, estructuras metálicas y perfiles secundarios mediante barras de unión y bajantes, formando una red con baja impedancia de lazo (Z_{loop}). Esta medida limita el voltaje de toque (V_{touch}) en trayectorias accesibles, verificándose su cumplimiento mediante la medición de continuidad y resistencia según IEEE 81.

2. Puesta a tierra de la estructura

Se instalan múltiples bajantes conectados a una red de tierra con baja impedancia (Z_g), ajustada a la resistividad del terreno mediante el método Wenner/Schlumberger. Un valor reducido de Z_g disminuye la elevación del potencial estructural en condiciones de falla o acoplamiento.

3. Aislamiento de pasamanos y superficies accesibles

Se emplean recubrimientos con rigidez dieléctrica superior a 1 kV y se realizan ensayos de resistencia de aislamiento (IR) alrededor de 1 kV DC. Esta técnica añade impedancia serie, reduciendo la corriente inicial $i(0+) = V_b/R_{eq}$ sin incrementar la energía almacenada.

4. Control de elementos temporales y auxiliares

Todo componente metálico temporal debe conectarse a la red equipotencial y a tierra, evitando estados flotantes que incrementen el riesgo de microdescargas o tensiones peligrosas.

5. Gestión operativa y ambiental

Las actividades de mantenimiento se programan evitando condiciones de baja humedad relativa y viento seco que aumenten la constante κ . Se promueve el contacto firme (sin fricción) y aproximaciones lentas, junto con señalización y capacitación para prevenir microdescargas.

6. Criterios de aceptación

Los niveles máximos de campo eléctrico y magnético a 1 m de la estructura deben cumplir:

- a. $E_{\text{máx}}$, $B_{\text{máx}}$ por debajo de los límites establecidos por ICNIRP y RETIE (IEEE 644, IEC 61786-2).
- b. Continuidad equipotencial sin discontinuidades.
- c. Valores de Z_g y Z_{loop} homogéneos y bajos.
- d. Pasamanos con resistencia de aislamiento adecuada.
- e. Diferencia de potencial (ΔV) no peligrosa en zonas accesibles (IEC 60479-1).

Estas medidas, combinadas con un monitoreo periódico y el cumplimiento de los criterios normativos, garantizan la protección frente a descargas eléctricas, la reducción de gradientes de potencial peligrosos y el mantenimiento de campos electromagnéticos dentro de márgenes seguros.

Discusión

Los resultados obtenidos son consistentes con los reportados por Ahsan et al. [14], quienes realizaron una comparación entre modelos matemáticos y simulaciones computacionales para la evaluación del campo eléctrico bajo líneas aéreas de transmisión de 400 kV. Los autores demostraron que la máxima intensidad del campo eléctrico se presenta bajo el eje de los conductores y disminuye progresivamente con la distancia lateral, comportamiento similar al observado en el presente estudio. Asimismo, identificaron que la altura de los conductores y la configuración geométrica de la línea constituyen variables determinantes en la reducción de la exposición electromagnética. Estos hallazgos respaldan la metodología empleada y confirman que, bajo condiciones adecuadas de diseño, los niveles de campo eléctrico pueden mantenerse dentro de los límites establecidos por los estándares internacionales de seguridad. De igual manera, los valores encontrados son comparables con los reportados por Boudjella et al. [12] en sistemas de transmisión de alta tensión, donde los niveles de campo magnético permanecieron significativamente por debajo de los límites internacionales de exposición humana.

En relación con la percepción del riesgo, los resultados obtenidos coinciden con las observaciones de Rezaian [15], quien señala que los principales desafíos asociados a las infraestructuras ubicadas cerca de líneas de transmisión no siempre se derivan de riesgos físicos directos, sino de la percepción pública de inseguridad y de la necesidad de implementar medidas de mitigación visibles. En este sentido, aunque los campos eléctricos y magnéticos calculados en el presente estudio se mantienen por debajo de los límites establecidos por RETIE e ICNIRP, la aplicación de estrategias como la equipotencialización, la puesta a tierra y el aislamiento de superficies accesibles resulta fundamental para reducir la percepción de riesgo y fortalecer la aceptación social de la infraestructura. Asimismo, estos resultados respaldan los planteamientos de Boukabou y Kaabouch [20], quienes destacan que la adecuada gestión de las distancias de seguridad, la implementación de sistemas efectivos de puesta a tierra y el control de estructuras metálicas permiten garantizar condiciones seguras de operación incluso en entornos con líneas de transmisión de extra alta tensión.

En conjunto, los resultados obtenidos evidencian que la coexistencia entre infraestructura vial y líneas de transmisión de 500 kV puede ser técnicamente viable cuando se aplican medidas de mitigación adecuadas y se verifica el cumplimiento de los estándares internacionales de exposición electromagnética.

Limitaciones del estudio

El presente estudio presenta algunas limitaciones que deben considerarse en la interpretación de los resultados. En primer lugar, los análisis se realizaron mediante modelos electromagnéticos basados en parámetros geométricos y eléctricos representativos de la línea de transmisión, sin incluir mediciones experimentales en campo durante diferentes condiciones operativas.

En segundo lugar, las simulaciones se desarrollaron considerando condiciones atmosféricas normales, por lo que no se evaluó el efecto de variables ambientales extremas como lluvias intensas, descargas atmosféricas o variaciones significativas de humedad relativa.

Adicionalmente, el análisis se centró en una configuración específica de línea de transmisión de 500 kV y un único diseño de puente peatonal, por lo que la extrapolación de los resultados a otras configuraciones debe realizarse con precaución.

Finalmente, la evaluación de las microdescargas se basó en modelos teóricos de acoplamiento capacitivo y no incluyó pruebas experimentales con usuarios reales. Investigaciones futuras podrían incorporar campañas de medición en campo y estudios de percepción del riesgo para complementar los resultados obtenidos.

Conclusiones

Los resultados evidencian que el campo eléctrico máximo (kV/m) y el campo magnético máximo (μ T) bajo la línea de transmisión de 500 kV se mantienen por debajo de los límites establecidos por RETIE e ICNIRP para exposición del público. La energía asociada a microdescargas (mJ) confirma que, aunque perceptible, no representa un riesgo significativo para la salud, pero sí demanda estrategias para garantizar confort y aceptación social. Las medidas de mitigación propuestas —equipotencialización, puesta a tierra, aislamiento de superficies y gestión operativa— aseguran márgenes de seguridad superiores a los normativos. En consecuencia, la coexistencia entre la infraestructura vial y la línea de transmisión es viable desde el punto de vista electromagnético, siempre que se apliquen las acciones preventivas definidas y se mantenga un plan de verificación periódica conforme a IEEE 644-2019.

Referencias

- [1] Ministerio de Minas y Energía, *Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE)*, Bogotá, Colombia: Ministerio de Minas y Energía, 2024. [Online]. Available: <https://www.minenergia.gov.co>
- [2] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection ICNIRP, "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz)," *Health Physics*, vol. 118, no. 2, pp. 133–186, 2020.
- [3] IEEE, *IEEE Recommended Practice for Measurements and Computations of Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields with Respect to Human Exposure to Such Fields*, IEEE Std C95.3-2021, 2021.
- [4] IEEE Power & Energy Society, *IEEE Standard for Calculating the Current Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors*, IEEE Std 738-2018, 2018.
- [5] IEEE, *IEEE Standard Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields from AC Power Lines*, IEEE Std 644-2019, 2019.
- [6] S. G. Caliskan, M. A. Kilic, D. B. Ilhan, *et al.*, "Evaluation of Electromagnetic Field Levels and Student Exposure at Aydin Adnan Menderes University Central Campus," *GU J Sci, Part A*, vol. 9, no. 3, pp. 314–322, 2022, doi: [10.54287/gujisa.1151793](https://doi.org/10.54287/gujisa.1151793)
- [7] H. Tian *et al.*, "System-level biological effects of extremely low-frequency electromagnetic fields: an in vivo experimental review," *Front. Neurosci.*, vol. 17, 1247021, 2023, doi: [10.3389/fnins.2023.1247021](https://doi.org/10.3389/fnins.2023.1247021)
- [8] L. Liu, B. Huang, Y. Lu, Y. Zhao, X. Tang, y Y. Shi, "Interactions between electromagnetic radiation and biological systems," *iScience*, vol. 27, no. 3, art. 109201, Mar. 2024, doi: [10.1016/j.isci.2024.109201](https://doi.org/10.1016/j.isci.2024.109201)

- [9] D. Schuermann y M. Mevissen, "Manmade Electromagnetic Fields and Oxidative Stress—Biological Effects and Consequences for Health," *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 22, no. 7, p. 3772, 2021, doi: [10.3390/ijms22073772](https://doi.org/10.3390/ijms22073772)
- [10] A. Hirata *et al.*, "Human exposure assessment to electromagnetic fields: Review and future directions," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 63, no. 5, pp. 1619–1630, Oct. 2021, doi: [10.1109/TEMC.2021.3109249](https://doi.org/10.1109/TEMC.2021.3109249)
- [11] B. Levitt, H. C. Lai, y A. M. Manville, "Effects of non-ionizing electromagnetic fields on flora and fauna, Part 2 impacts: how species interact with natural and man-made EMF," *Reviews on Environmental Health*, vol. 37, no. 3, pp. 327–406, 2022, doi: [10.1515/reveh-2021-0050](https://doi.org/10.1515/reveh-2021-0050)
- [12] H. Boudjella, A. N. E. I. Ayad, T. Rouibah, B. Larouci, T. A. H. Alghamdi, A. Althobaiti, S. M. Ghoneim, y A. S. Tayeb, "Magnetic field evaluation around 400 kV underground power cable under harmonics effects," *Diagnostyka*, vol. 23, no. 2, pp. 2022209, 2022, doi: [10.29354/diag/150068](https://doi.org/10.29354/diag/150068)
- [13] H. Ahmadi, S. Mohseni, y A. S. Akmal, "Electromagnetic fields near transmission lines – problems and solutions," *Journal of Environmental Health Science & Engineering*, vol. 7, no. 2, 2010. [Online]. Available: <https://ijehse.tums.ac.ir/index.php/ijehse/article/view/246/245>
- [14] M. Ahsan, M. N. R. Baharom, I. U. Khalil, y Z. Zainal, "Comparative analysis of mathematical and simulation models for electric field generated beneath 400 kV overhead transmission lines," *Measurement*, vol. 256, Part E, 118566, 2025, doi: [10.1016/j.measurement.2025.118566](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.118566)
- [15] S. Rezaian, "Environmental, health, and safety risks of the power lines nearby the human settlements," *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, vol. 22, no. 8, pp. 1696–1707, 2016, doi: [10.1080/10807039.2016.1218272](https://doi.org/10.1080/10807039.2016.1218272)
- [16] Y. Hu, Y. Ding, y S. Zhang, "Reliability Assessment of Transmission Lines Considering Extreme Weather Conditions and Human Factors," *IEEE PES General Meeting*, Atlanta, GA, USA, pp. 1–5, 2019, doi: [10.1109/PESGM40551.2019.8974118](https://doi.org/10.1109/PESGM40551.2019.8974118)
- [17] J. Arrillaga y C. P. Arnold, *Computer Analysis of Power Systems*. Chichester, U.K.: Wiley, 2000.
- [18] M. N. O. Sadiku, *Elements of Electromagnetics*, 8th ed., New York, NY, USA: Oxford Univ. Press, 2021.
- [19] W. H. Hayt y J. A. Buck, *Engineering Electromagnetics*, 9th ed., New York, NY, USA: McGraw-Hill Education, 2019.
- [20] I. Boukabou y N. Kaabouch, "Electric and magnetic fields analysis of the safety distance for UAV inspection around extra-high voltage transmission lines," *Drones*, vol. 8, no. 2, p. 47, 2024, doi: [10.3390/drones8020047](https://doi.org/10.3390/drones8020047)
- [21] A. Fereidouni, B. Vahidi, F. Shishehgar, T. Hosseini Mehr, and M. Tahmasbi, "Human body modeling in the vicinity of high voltage transmission lines," *Sci. Int. (Lahore)*, vol. 26, no. 3, pp. 1017–1031, Jul.–Aug. 2014. [Online]. Available: <https://www.sci-int.com/pdf/636639079391724013.pdf>
- [22] C. Aliau-Bonet and R. Pallàs-Areny, "A novel method to estimate body capacitance to ground at mid frequencies," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 62, no. 9, pp. 2519–2525, Sept. 2013, doi: [10.1109/TIM.2013.2258240](https://doi.org/10.1109/TIM.2013.2258240)
- [23] International Electrotechnical Commission (IEC), *Effects of Current on Human Beings and Livestock – Part 1: General Aspects*, IEC 60479-1:2018, 1st ed. Geneva, Switzerland: IEC, Dec. 2018.

Declaración sobre el uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores declaramos haber utilizado ChatGPT-4o para múltiples tareas: la revisión gramatical y de estilo y el apoyo en la estructura y redacción. Todos los resultados e información asistidos por IA fueron revisados, verificados y validados minuciosamente por los autores, quienes asumen plena responsabilidad por la precisión, coherencia e integridad del contenido publicado.