



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO**  
**VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN,**  
**VINCULACIÓN Y POSGRADO**  
**DIRECCIÓN DE POSGRADO**

**TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE:**  
**MAGÍSTER EN MATEMÁTICA APLICADA MENCIÓN EN**  
**MATEMÁTICA COMPUTACIONAL**

**TEMA:**

“DISEÑO DE UN MODELO MATEMÁTICO DEL COMPORTAMIENTO  
DE LA INTENSIDAD DE CAMPO ELÉCTRICO GENERADO POR LAS  
ANTENAS CELULARES EN LA ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA  
DE CHIMBORAZO”

**AUTOR:**

Ing. Luis Javier Castillo Heredia

**TUTOR:**

Ing. Lorena Molina Valdiviezo., Ph.D

**Riobamba – Ecuador**

2025

### **Certificación del Tutor**

Certifico que el presente trabajo de titulación denominado: **“Diseño de un modelo matemático del comportamiento de la intensidad de campo eléctrico generado por las antenas celulares en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo”**, ha sido elaborado por el Ingeniero Luis Javier Castillo Heredia, el mismo que ha sido orientado y revisado con el asesoramiento permanente de mi persona en calidad de Tutor. Así mismo, refrendo que dicho trabajo de titulación ha sido revisado por la herramienta antiplagio institucional; por lo que certifico que se encuentra apto para su presentación y defensa respectiva.

Es todo cuanto puedo informar en honor a la verdad.

Riobamba, 20 de enero, de 2025



Ing. Lorena Paulina Molina Valdiviezo, PhD.

**TUTOR**

## Declaración de Autoría y Cesión de Derechos

Yo, **Luis Javier Castillo Heredia**, con número único de identificación **06051176-6**, declaro y acepto ser responsable de las ideas, doctrinas, resultados y lineamientos alternativos realizados en el presente trabajo de titulación denominado: “Diseño de un modelo matemático del comportamiento de la intensidad de campo eléctrico generado por las antenas celulares en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo” previo a la obtención del grado de Magíster en Matemática Aplicada con mención en Matemática Computacional.

- Declaro que mi trabajo investigativo pertenece al patrimonio de la Universidad Nacional de Chimborazo de conformidad con lo establecido en el artículo 20 literal j de la Ley Orgánica de Educación Superior LOES.
- Autorizo a la Universidad Nacional de Chimborazo que pueda hacer uso del referido trabajo de titulación y a difundirlo como estime conveniente por cualquier medio conocido, y para que sea integrado en formato digital al Sistema de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor, dando cumplimiento de esta manera a lo estipulado en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior LOES.

Riobamba, 20 de enero, de 2025



---

**Ing. Luis Javier Castillo Heredia**

0605110766

## **Agradecimiento**

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas y entidades que hicieron posible la realización de este trabajo de investigación. En primer lugar, a Dios por darme la fortaleza y perseverancia para completar este proyecto.

Agradezco profundamente a mi tutora, la Ing. Lorena Paulina Molina Valdiviezo, PhD., por su guía, conocimientos y apoyo incondicional durante cada etapa de este proceso. También quiero extender mi gratitud a la Universidad Nacional de Chimborazo, por brindarme los recursos y el entorno académico necesarios para desarrollar esta investigación.

A mis amigos y compañeros de estudio, quienes con su apoyo y ánimo hicieron de este camino una experiencia enriquecedora. Y, especialmente, a mi pareja, por su paciencia, comprensión y por ser mi mayor fuente de apoyo emocional y motivación en cada momento. Finalmente, a mi familia, por su amor y fe inquebrantable, que me han inspirado a superar cada obstáculo.

## **Dedicatoria**

Dedico este trabajo con todo mi cariño y gratitud a mi pareja, quien ha sido mi pilar fundamental durante todo este proceso. Por su amor, paciencia y apoyo constante, que me han dado la fuerza para alcanzar mis metas. Este logro es tanto mío como suyo, y lo dedico con todo mi corazón.

Asimismo, a mi familia, especialmente a mis padres, por su amor incondicional y sacrificios que me han permitido llegar hasta aquí. A mis profesores y mentores, quienes con su dedicación y enseñanza me han guiado en mi formación académica y personal. A todos aquellos que han estado a mi lado en este camino, les ofrezco mi más profundo agradecimiento.

## Índice General

<b>Certificación del Tutor</b> .....	<b>ii</b>
<b>Declaración de Autoría y Cesión de Derechos</b> .....	<b>iii</b>
<b>Agradecimiento</b> .....	<b>iv</b>
<b>Dedicatoria</b> .....	<b>v</b>
<b>Índice General</b> .....	<b>vi</b>
<b>Índice de Tablas</b> .....	<b>viii</b>
<b>Índice de Figuras</b> .....	<b>ix</b>
<b>Resumen</b> .....	<b>1</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>2</b>
<b>Introducción</b> .....	<b>3</b>
<b>Capítulo 1 Generalidades</b> .....	<b>6</b>
1.1 Planteamiento del problema .....	6
1.2 Justificación de la Investigación.....	8
1.3 Objetivos.....	10
1.3.1 Objetivo General .....	10
1.3.2 Objetivos Específicos.....	10
<b>Capítulo 2 Estado del Arte y la Práctica</b> .....	<b>11</b>
2.1 Antecedentes Investigativos .....	11
2.1.1 Internacionales .....	11
2.1.2 Nacionales .....	12
2.2 Fundamentación Teórica .....	14
2.2.1 Comportamiento del campo electromagnético.....	14
2.2.2 Antenas de celulares.....	22
2.2.3 Modelos matemáticos.....	24

2.2.4	Normativa internacional ICNIRP .....	29
<b>Capítulo 3 Diseño Metodológico.....</b>		<b>38</b>
3.1	Enfoque de Investigación .....	38
3.2	Diseño de la Investigación.....	38
3.3	Tipo de Investigación .....	39
3.4	Niveles de Investigación.....	39
3.5	Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos.....	40
3.6	Técnicas para el Procesamiento e Interpretación de Datos .....	43
<b>Capítulo 4 Análisis y Discusión de los Resultados .....</b>		<b>49</b>
4.1	Análisis Descriptivo de los Resultados .....	49
4.1.1	Regresión exponencial .....	49
4.1.2	Regresión Lineal .....	55
4.1.3	Regresión No lineal.....	57
4.1.4	Regresión Polinómica .....	66
4.1.5	Estimación del modelo mejor ajustado .....	70
4.1.6	Comparación de los resultados con los parámetros del estándar internacional ICNIRP .....	71
4.2	Discusión de los Resultados .....	73
<b>Conclusiones.....</b>		<b>78</b>
<b>Recomendaciones.....</b>		<b>79</b>
<b>Referencias bibliografía .....</b>		<b>81</b>

## Índice de Tablas

Tabla 1 <i>Niveles de referencia para exposición ocupacional a campos eléctricos y magnéticos (valores rms no perturbados)</i> .....	32
Tabla 2 <i>Niveles de referencia para exposición poblacional a campos eléctricos y magnéticos (valores rms no perturbados)</i> .....	34
Tabla 3: <i>Datos de medición del campo electromagnético</i> .....	44
Tabla 4: <i>Ajuste del modelo</i> .....	51
Tabla 5: <i>Intervalos de confianza del modelo exponencial</i> .....	53
Tabla 6: <i>Intervalos de predicción</i> .....	54
Tabla 7: <i>Mediciones exploratorias transformado la variable distancia con inverso</i> .....	58
Tabla 8: <i>Datos exploratorios transformados a la variable distancia con logaritmo</i> .....	60
Tabla 9: <i>Datos linealizados del modelo potencia</i> .....	64
Tabla 10: <i>Valores del ajuste de modelo de regresión polinómica</i> .....	67
Tabla 11: <i>Valores del ajuste del modelo de regresión polinómica de grado 4</i> .....	68
Tabla 12: <i>Categorización de los modelos más precisos</i> .....	70

## Índice de Figuras

Figura 1. <i>Relación entre la intensidad de campo eléctrico y la distancia</i> .....	19
Figura 2. <i>Diagrama de Cajas de la Intensidad del Campo Electromagnético por Periodo del Día</i> .....	47
Figura 3: <i>Mediciones Observados mediante regresión exponencial</i> .....	49
Figura 4: <i>Mediciones observadas linealizadas</i> .....	50
Figura 5: <i>Ajuste del modelo de regresión exponencial</i> .....	51
Figura 6 : <i>Mediciones reales de la de regresión exponencial</i> .....	52
Figura 7: <i>Homocedasticidad e independencia</i> .....	55
Figura 8: <i>Mediciones exploratorias de la regresión lineal</i> .....	56
Figura 9: <i>Diagrama linealizado</i> .....	56
Figura 10: <i>Mediciones exploratorias del modelo inverso</i> .....	57
Figura 11: <i>Medición exploratoria transformado la variable distancia con inverso</i> .....	58
Figura 12: <i>Datos reales bajo el modelo inverso</i> .....	59
Figura 13: <i>Diagrama de dispersión del modelo logarítmico</i> .....	60
Figura 14: <i>Representación exploratoria transformado a la variable distancia con logaritmo</i> .....	61
Figura 15: <i>Modelo logarítmico linealizado</i> .....	62
Figura 16: <i>Ajuste del modelo logarítmico</i> .....	62
Figura 17: <i>Representación exploratoria del modelo potencia</i> .....	63
Figura 18: <i>Diagrama linealizado del modelo potencia</i> .....	64
Figura 19: <i>Ajuste del modelo linealizado potencia</i> .....	65
Figura 20: <i>Ajuste del modelo potencia</i> .....	66
Figura 21: <i>Representación exploratoria de la regresión polinómica</i> .....	66
Figura 22 <i>Ajuste del modelo de regresión polinómica de grado 2</i> .....	67

Figura 23: <i>Ajuste del modelo de regresión polinómica de grado 4</i> .....	68
Figura 24: <i>Ajuste del modelo de regresión polinómica de grado 6</i> .....	69
Figura 25: <i>Valores del ajuste del modelo de regresión polinómica de grado 6</i> .....	69
Figura 26 : <i>Comparación de mediciones con los estándares de ICNIRP</i> .....	72
Figura 27 : <i>Predicciones del modelo con intervalos de confianza y predicción de los datos obtenidos</i> .....	73

## Resumen

El presente trabajo titulado “Modelamiento Matemático del Comportamiento de la Intensidad de Campo Eléctrico Generado por las Antenas Celulares en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo” aborda el análisis de los niveles de radiación electromagnética emitidos por las antenas de telefonía móvil en el campus universitario. La investigación se centra en desarrollar un modelo matemático que permita predecir la intensidad del campo eléctrico en función de la ubicación de las antenas y las características del entorno. El objetivo general del estudio es diseñar un modelo predictivo que estime los niveles de exposición a radiación electromagnética generada por las antenas celulares en escuela superior mencionada anteriormente, proporcionando así una herramienta para la evaluación y gestión del riesgo en la comunidad universitaria. Para lograrlo, se aplicó una metodología cuantitativa, que incluyó la medición de la intensidad del campo eléctrico en diferentes puntos del campus mediante equipos especializados, como el Narda SRM-3006 y el EME Spy-200, y el análisis de los datos utilizando técnicas de modelado matemático en el software R. Los resultados principales indican que los niveles de radiación están por debajo de los límites establecidos por la ICNIRP, aunque varían según la proximidad a las antenas y las características estructurales de los edificios cercanos. En conclusión, el modelo propuesto responde eficazmente al objetivo planteado, proporcionando predicciones precisas que pueden contribuir a la mejora en la planificación de infraestructuras de telecomunicaciones.

**Palabras claves:** Modelamiento, matemático, intensidad, campo eléctrico, antenas.

## Abstract

The present work entitled "Design of a Mathematical Model of the Behavior of Electric Field Intensity Generated by Cellular Antennas at the Escuela Superior Politécnica de Chimborazo" addresses the analysis of the levels of electromagnetic radiation emitted by mobile phone antennas on the university campus. The research focuses on developing a mathematical model that allows predicting the intensity of the electric field based on the antennas' location and the environment's characteristics. The study's general objective is to design a predictive model that estimates the levels of exposure to electromagnetic radiation generated by cellular antennas at this university, thus providing a tool for risk assessment and management in the university community. A quantitative methodology was applied to this study, which included the measurement of the electric field intensity at different points of the campus using specialized equipment, such as the Narda SRM-3006 and the EME Spy-200, and the analysis of data using mathematical modeling techniques in the R software. The main results indicate that the radiation levels are below the limits established by the ICNIRP. However, they vary depending on the antennas' proximity and the nearby buildings' structural characteristics. In conclusion, the proposed model effectively responds to the stated objective, providing accurate predictions that can improve the planning of telecommunications infrastructures.

**Keywords:** Modeling, mathematics, intensity, electric field, antennas.



Reviewed by:  
Mgs. Jenny Alexandra Freire Rivera  
**ENGLISH PROFESSOR**  
C.C. 0604235036

## **Introducción**

La presencia de los campos electromagnéticos, especialmente aquellos generados por radiobases de telefonía móvil, ha despertado una creciente preocupación a nivel mundial debido a sus posibles efectos sobre la salud. Este fenómeno ha impulsado la creación de protocolos estandarizados para medir dichos campos y evaluar su impacto en diversas zonas, especialmente urbanas, donde la densidad de antenas y la proximidad a las mismas pueden influir en los niveles de exposición. En este contexto, la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), presenta una situación particular, con una infraestructura y ubicación que la convierten en un objeto de estudio idóneo para investigar los niveles de radiación electromagnética en entornos educativos.

El objetivo principal de esta investigación es diseñar un modelo matemático que facilite la predicción de la intensidad del campo eléctrico producido por las antenas celulares instaladas en la ESPOCH. Con este modelo, se busca analizar los niveles de exposición a campos electromagnéticos de radiofrecuencia (RF-EMF) que afectan tanto a la comunidad académica como a los habitantes cercanos. La información obtenida será crucial para respaldar decisiones relacionadas con la planificación de la infraestructura y la adopción de estrategias para mitigar posibles riesgos.

En el ámbito académico, este trabajo contribuirá al acervo de conocimientos sobre la propagación de ondas electromagnéticas en entornos específicos como son las instituciones educativas. A nivel empresarial, los resultados serán útiles para las compañías de telecomunicaciones en la optimización de la instalación de antenas, garantizando que estas cumplan con los límites de seguridad. Desde una perspectiva social, el proyecto permitirá a las autoridades evaluar y mejorar las políticas de protección frente a los efectos

potencialmente nocivos de los RF-EMF, con especial atención en la salud pública y la seguridad estudiantil.

Metodológicamente, el estudio adoptará un enfoque cuantitativo, basado en la recolección y análisis de datos numéricos relacionados con la intensidad del campo eléctrico. Se emplearán mediciones in situ utilizando equipos especializados como el Narda SRM-3006 y el EME Spy-200, así como técnicas avanzadas de análisis estadístico y modelado matemático a través del software R. El modelo propuesto será validado mediante la comparación con datos empíricos, asegurando su precisión en la predicción de la intensidad de campo bajo distintas condiciones.

Los resultados esperados incluyen el desarrollo de un modelo predictivo robusto que no solo permita evaluar los niveles actuales de exposición a radiofrecuencia en dicho escenario, sino también proyectar escenarios futuros ante la posible expansión de la infraestructura de telecomunicaciones y la implementación de nuevas tecnologías. Además, se espera que este modelo sirva como una herramienta de referencia para la formulación de políticas preventivas y la optimización de la ubicación de futuras antenas.

Por último, la estructura capitular del presente trabajo de investigación queda pautado de la siguiente manera:

- Capítulo 1 Generalidades, en este epígrafe se categoriza el planteamiento del problema, la justificación de la investigación, los objetivos y la descripción de la institución en estudio.
- Capítulo 2 Estado del Arte y la Práctica, en este punto se sintetiza tanto los antecedentes internacionales como nacionales, donde se considera principalmente la fundamentación teórica de los principales ejes temáticos que aborda el estudio.

- Capítulo 3 Diseño Metodológico, en este apartado se exhibe tanto el enfoque de la investigación, como el diseño, tipo y nivel metodológico que se desarrolla para alcanzar los objetivos pautados. Al mismo tiempo, se describe las técnicas e instrumentos para recolectar la información pertinente, destacando su proceso de aplicación y los métodos de procesamiento e interpretación.
- Capítulo 4 Análisis y Discusión de los Resultados, se especifica la información alcanzada tras la aplicación de los instrumentos seleccionados, donde se toma en cuenta la aplicación de regresiones tales como: exponenciales, lineales, no lineales, polinómicas, las cuales fueron ordenadas en función de su grado de precisión.
- Conclusiones y recomendaciones, las cuales derivan de los resultados del estudio, permitiendo así dar respuesta acorde a las metas de la investigación.

## Capítulo 1

### Generalidades

#### 1.1 Planteamiento del problema

En el ámbito global, la exposición a los RF-EMF ha suscitado una preocupación ascendente en virtud de su posible influencia en la salud de las personas. Frente a este escenario, entidades de carácter internacional y organismos nacionales, tales como la Agencia Nacional de Frecuencias (ANFR) de Francia, han instaurado protocolos normalizados con el propósito de efectuar mediciones *in situ* de los RF-EMF (De Guidici et al., 2021). Dichos protocolos se centran en la cuantificación de la intensidad de campo en ubicaciones determinadas mediante el uso de mediciones discretas. Tales iniciativas surgen como respuesta a la demanda de una sociedad que, con creciente conciencia, desconoce si existe riesgos potenciales inherentes a la tecnología de comunicaciones móviles (Adheed y Gusoon, 2023).

En este caso, diversas investigaciones efectuadas por entidades internacionales han evidenciado que las estaciones base de telefonía móvil (MPBS) constituyen una fuente considerable de exposición a campos electromagnéticos de radiofrecuencia (RF-EMF) en zonas urbanas. Se ha determinado que la magnitud de la exposición a RF-EMF fluctúa significativamente en función de diversos factores: la proximidad de las residencias a las antenas, la existencia de una línea de visión despejada hacia estas, la distancia hasta la antena más cercana y la elevación del piso residencial (Cumbajin et al., 2023).

Asimismo, se ha constatado que la exposición tiende a incrementarse fuera de los hogares y durante las horas diurnas, con mediciones instantáneas que exceden con creces los valores registrados por los exposímetros personales (PEM). Estos hallazgos apuntan a que, si bien los niveles promedio de RF-EMF pueden ser reducidos, la posibilidad de efectos

adversos sobre la salud, derivados de una exposición sostenida, no puede ser descartada (Lala et al., 2018).

En el contexto de recientes investigaciones epidemiológicas llevadas a cabo en Francia, se efectuaron mediciones específicas de RF-EMF en los domicilios de individuos residenciados en áreas urbanas adyacentes a estaciones base de telefonía móvil. Los resultados revelaron que la exposición a RF-EMF se ve afectada por variables tales como la orientación de las ventanas respecto a las antenas, la separación entre estas y la altura del piso del inmueble. Complementariamente, los datos obtenidos mediante encuestas con exposímetros personales (PEM) indicaron que la exposición era superior durante las actividades fuera del hogar en comparación con la permanencia en el mismo, y más elevada durante el periodo diurno en contraste con el nocturno, sin que se manifestaran variaciones notables entre los días de descanso y los laborales (De Guidici et al., 2021).

Las investigaciones adicionales han revelado que la exposición a los RF-EMF puede experimentar variaciones significativas en función de la densidad y configuración de la infraestructura de telecomunicaciones, así como de la densidad demográfica en zonas urbanas (Rangkooy et al., 2023). Elementos como la cercanía a diversas fuentes emisoras y la concentración de radiación en puntos concretos ejercen una influencia notable en los niveles de exposición. Estos análisis subrayan la necesidad de adoptar una perspectiva integral y meticulosa para la evaluación y reducción de la exposición a RF-EMF en comunidades situadas en las proximidades de estaciones base de telefonía móvil (Koppel y Hardell, 2022).

En el contexto específico de la ESPOCH, la presencia de antenas de telefonía celular y la resultante exposición a RF-EMF constituyen una cuestión de particular interés. Surge, por tanto, la imperiosa necesidad de desarrollar un modelo matemático capaz de predecir con exactitud la intensidad del campo eléctrico. Este requerimiento cobra relevancia ante la

premisa de asegurar la protección tanto de la comunidad académica como de los residentes de las áreas aledañas. La evaluación meticulosa de la exposición es fundamental para la creación de políticas y la inclusión de estrategias preventivas que resguarden a las personas de los posibles efectos nocivos asociados a la radiación electromagnética.

El contexto académico de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo se distingue por poseer atributos distintivos que deben ser meticulosamente incorporados en la elaboración de un modelo matemático. Entre estos se cuentan la disposición espacial de los edificios, sus dimensiones y materiales constitutivos, la densidad de ocupación de los mismos, así como la ubicación y configuración de las antenas celulares dentro del recinto universitario. Un modelo predictivo confiable no solo facilitará la valoración precisa de los niveles de exposición presentes, sino que también posibilitará la simulación de condiciones futuras y la optimización de la infraestructura de telecomunicaciones, con el fin de reducir al mínimo la exposición innecesaria a RF-EMF.

Con todo lo expuesto se deriva la principal interrogante del presente estudio: ¿El campo eléctrico generada por las antenas de la ESPOCH emiten niveles altos que pueden afectar la salud de las personas aledañas a las antenas celulares de la localidad?

## **1.2 Justificación de la Investigación**

La base teórica de esta investigación se fundamenta en la importancia de comprender y predecir la intensidad del campo eléctrico generado por las antenas celulares, un factor clave en la era de las comunicaciones inalámbricas. La ESPOCH con su infraestructura y alta densidad poblacional, representa un entorno ideal para estudiar estos fenómenos. Fundamentado en la teoría electromagnética y apoyándose en las Ecuaciones de Maxwell, siendo pilares fundamentales para la descripción de los campos eléctricos y magnéticos, por

lo que el diseño de un modelo matemático ajustado a las condiciones particulares que aborda la ESPOCH, se orientan en función a las líneas que aborda la dirección de los organismos internacionales competentes en el área, tales como ANFR en su dirección para la evaluación sistemática de propagación ondulada y limitaciones de campo. En este caso, este estudio promete aportar significativamente al acervo de conocimientos existentes, sentando bases robustas para investigaciones futuras y aplicaciones prácticas.

Desde la perspectiva práctica, el modelo matemático que se propone ostenta la capacidad de incidir de manera positiva en la planificación urbana y en la salud pública. Mediante la predicción precisa de los niveles de radiación del campo eléctrico, se posibilitará a las autoridades competentes la implementación de medidas de seguridad y regulaciones orientadas a la minimización de la exposición radiactiva, con especial énfasis en los entornos educativos donde prevalece la seguridad estudiantil y del personal. Adicionalmente, este modelo se postula como una herramienta valiosa para la optimización de la ubicación y diseño de instalaciones futuras de antenas celulares, garantizando su conformidad con los límites de seguridad estipulados por la *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection* (ICNIRP).

Metodológicamente, el estudio se abocará a un enfoque cuantitativo y analítico, empleando herramientas de modelado matemático y simulación computacional. La metodología elegida se presenta como la ideal para enfrentar la complejidad inherente a los campos electromagnéticos y facilita una valoración precisa de los niveles de radiación bajo distintos escenarios. La validación del modelo matemático, mediante la confrontación con mediciones empíricas, asegurará la confiabilidad de los resultados obtenidos. Asimismo, al alinear el modelo con los estándares de la ICNIRP, se garantiza que los descubrimientos sean aplicables a nivel global y acaten las directrices de seguridad más estrictas.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo General**

- Diseñar un modelo matemático del comportamiento de la intensidad de campo eléctrico generado por las antenas celulares en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

#### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Analizar los tipos de modelos matemáticos y las radiaciones de campo eléctrico emitidas por las antenas celulares.
- Diseñar un modelo matemático para la predicción los niveles de radiación de campo eléctrico.
- Evaluar el modelo matemático propuesto bajo los parámetros del estándar internacional ICNIRP.

## Capítulo 2

### Estado del Arte y la Práctica

#### 2.1 Antecedentes Investigativos

##### 2.1.1 Internacionales

En primera instancia, se toma en cuenta a los autores Ramírez y Escobar (2020), las cuales realizaron un artículo científico titulado “Measurements and Analysis of Personal Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields at Outdoor and Indoor School Buildings: A Case Study at a Spanish School”, donde su principal objetivo fue medir la exhibición a los campos electromagnéticos de RF de los niños en áreas escolares, donde los niños están expuestos durante un período de tiempo significativo a dichos campos. Los métodos aplicados se ejecutaron mediante un enfoque cualitativo y con una estructura de seis etapas referente al diseño, medición y georreferenciación de los resultados.

Seguidamente los hallazgos de los autores exponen que los niveles de exposición individual a los RF en la escuela Antonio Machado, en Albacete, España, se registró estándares más altos de exposición dentro de los edificios escolares durante la semana y alrededor del área escolar durante el fin de semana. Asimismo, los niveles de exposición a la radiación de la telefonía móvil se encuentran por debajo de los límites de referencia definidos por las normativas internacionales.

En el artículo científico de Pawlak y Zure (2019), el cual fue titulado “On Measuring Electromagnetic Fields in 5G Technology”, tuvo como objetivo general analizar los problemas y desafíos relacionados con las mediciones de campos electromagnéticos en la tecnología 5G, que son cruciales para la evaluación del cumplimiento de los límites reglamentarios de los campos electromagnéticos. La metodología realizada en esta investigación se posicionó a través de un enfoque cuantitativo y exploratorio donde las mediciones realizadas fueron en el área de campo lejano. Los hallazgos sugieren que la

nueva metodología 5G debe tener en cuenta factores tales como el MIMO masivo y la conformación precisa del haz, las bandas de frecuencia en la región de ondas milimétricas, los nuevos diagramas de radiación de la antena, el acceso DDT al medio, el número de posibles haces simultáneos y la distribución de los terminales asociados a una estación de base determinada que provoque el movimiento de los haces en el espacio.

En el estudio realizado por los autores Wall et al., (2019), el cual se titula “*Real-World cell phone radiofrequency electromagnetic field exposures*”, cuyo objetivo fue determinar la densidad de potencia, en el mundo real como medida de exposición para una serie de modelos de teléfonos celulares registrados con diferentes operadores de redes móviles, tanto en condiciones de señal de recepción débil como fuerte. La metodología aplicada se orientó bajo un enfoque cuantitativo y de tipo exploratorio. Los hallazgos encontrados sugieren que en entornos típicos de señal de recepción de teléfonos celulares fuertes (4-5 barras de visualización) y débiles (1-2 barras de visualización), sugieren una serie de posibles formas de autoprotección para disminuir la exposición de los CEM de RF, en este artículo concluyen que debido a los niveles de emisión más altos para los teléfonos celulares que operan en entornos de señal de recepción débil, evitar o limitar el uso del teléfono celular en estas condiciones es la medida más obvia para reducir la exposición.

### **2.1.2 Nacionales**

Dentro de los antecedentes nacionales, se considera el análisis realizado por los autores Pazmiño et al., (2023), ya que mediante un artículo científico titulado: “Challenges and Opportunities of 5G Deployment in Ecuador” se pudo establecer como objetivo general el analizar los desafíos y oportunidades que implica el despliegue en 5G en Ecuador. La metodología aplicada se estipuló bajo una revisión documental, donde los hallazgos exhibieron que las nuevas bandas de frecuencia, junto con otras tecnologías, permiten que el 5G ofrezca altas velocidades de transmisión con baja latencia y alta eficiencia, pero

requiere más ancho de banda, por lo que, se necesitan frecuencias más altas. Los autores concluyen que se estima que el uso del ancho de banda disponible, 350 MHz, dentro de las bandas del espectro móvil, sería la alternativa más sencilla para el despliegue de 5G en Ecuador; mientras tanto, en caso de que se requieran frecuencias más altas o mayor ancho de banda, se debe realizar una revisión exhaustiva.

Por último, los autores Infante et al., (2020) desarrollaron un artículo titulado: “Análisis de los Niveles de Campos Eléctricos de la Banda GSM 1900MHz en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo”, donde el objetivo del estudio se posicionó en Evaluar si los niveles registrados se ajustan a las normativas del organismo de control o si hay razones válidas para que el temor de la gente persista ante el incremento de antenas de telefonía móvil y de internet móvil de alta velocidad. La metodología aplicada se estipuló de tipo cuantitativa y exploratoria, donde los hallazgos resaltan que, los campos eléctricos medidos, incluyendo los valores máximos, se situaron significativamente por debajo de los umbrales definidos por la autoridad reguladora (ARCOTEL), observándose una fluctuación de estos valores en los distintos días de medición. Se observó que en los días no laborables de la institución, cuando hay una menor presencia de personas utilizando los servicios de la estación base, los campos eléctricos registrados son menores, lo que indica un tráfico reducido. Como conclusión se destaca que la investigación permite comunicar a la comunidad de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo que los niveles de campos eléctricos detectados están dentro de los parámetros permitidos.

## **2.2 Fundamentación Teórica**

### **2.2.1 *Comportamiento del campo electromagnético***

#### **2.2.1.1 Campos electromagnéticos**

La interrelación entre cargas eléctricas y corrientes facilita la propagación de ondas electromagnéticas a través del espacio, las cuales son portadoras de energía y momento lineal (Eugene y Smolskiy, 2019). La comprensión teórica de estos campos es esencial, ya que desempeña un papel crucial en una variedad de aplicaciones tecnológicas, destacando entre ellas las telecomunicaciones y la radiodifusión, donde la precisión y eficiencia de la transmisión de información dependen intrínsecamente de la manipulación adecuada de estos campos electromagnéticos (Kivova et al., 2024).

La comprensión profunda de estos principios es indispensable para el diseño y la optimización de dispositivos tecnológicos, tales como antenas y sensores, que dependen de la manipulación precisa de estas fuerzas fundamentales (Bhatt et al., 2024).

#### **2.2.1.2 Onda electromagnética**

Una onda electromagnética se define como una perturbación que se difunde a través del espacio-tiempo, transportando energía de manera autónoma, sin la necesidad de un medio físico para su propagación. La teoría que describe las ondas electromagnéticas es piedra angular para el entendimiento de una multitud de fenómenos tanto naturales como tecnológicos, incluyendo la transmisión de señales de radio, la percepción de la luz visible y la emisión de radiación térmica (Abdalla et al., 2023).

Así, las ondas de radio tienen la capacidad de penetrar construcciones y otros obstáculos, en contraste con las ondas de luz visible, que pueden ser absorbidas o reflejadas por distintos materiales (Permyakov et al., 2019).

### **2.2.1.3 Espectro electromagnético**

Cada segmento de frecuencia dentro de este espectro posee atributos y usos particulares, a modo de ejemplo, las microondas son fundamentales tanto en el ámbito de las comunicaciones como en el funcionamiento de los hornos de cocina que llevan su nombre, mientras que la luz visible resulta imprescindible para la visión y actividades como la fotografía. Adicionalmente, el espectro electromagnético desempeña un papel crucial al evidenciar la interacción diversa entre distintos tipos de radiación y la materia (Cheng et al., 2022).

### **2.2.1.4 Espectro radioeléctrico**

El espectro radioeléctrico, un componente esencial del espectro electromagnético, incluye tanto las ondas de radio como las microondas. Esta porción es fundamental para el funcionamiento de las comunicaciones inalámbricas, abarcando desde la radio y la televisión hasta los teléfonos móviles y las redes Wi-Fi. Para preservar la eficacia operativa y evitar conflictos, las distintas bandas de frecuencia dentro del espectro radioeléctrico se encuentran sujetas a una regulación meticulosa que previene interferencias (Hao et al., 2021).

En contraposición, la administración del espectro radioeléctrico representa un reto significativo ante la demanda creciente de servicios inalámbricos. El incremento en la cantidad de dispositivos interconectados y la necesidad de un ancho de banda ampliado exigen una planificación y regulación estratégica para optimizar el uso del espectro disponible. Innovaciones como la radio cognitiva y el uso compartido del espectro emergen como soluciones prometedoras, destinadas a potenciar la eficiencia en la utilización del espectro radioeléctrico y favorecer una coexistencia armónica y adaptable de diversos servicios y aplicaciones (Roy et al., 2019)

### **2.2.1.5 Propagación de ondas electromagnéticas**

Las ondas electromagnéticas emergen de la aceleración de cargas eléctricas, un fenómeno que induce variaciones en los campos eléctricos y magnéticos y cuya propagación se extiende a través del espacio. Este proceso, articulado por las ecuaciones de Maxwell, revela la interdependencia entre campos eléctricos variables y la generación de campos magnéticos, y viceversa, facilitando así la difusión de la onda. Estas ondas poseen la capacidad de desplazarse por diversos medios, ya sea el vacío, el aire o distintos materiales, y su velocidad se ve influenciada por las características intrínsecas de estos medios (Permyakov et al., 2019).

Por otro lado, la transmisión de las ondas electromagnéticas no se presenta de manera homogénea, estando sujeta a fenómenos tales como la refracción y la difracción, los cuales varían en función de las propiedades del medio y la frecuencia de la onda. A modo de ilustración, las ondas de radio pueden experimentar reflexión en la ionosfera, lo que facilita la comunicación a gran escala, mientras que las ondas luminosas pueden sufrir refracción al transitar entre medios distintos, como del aire al vidrio. Adicionalmente, la difracción puede ocurrir cuando las ondas encuentran obstáculos, alterando así su trayectoria e intensidad (Massa et al., 2021).

### **2.2.1.6 Efectos de propagación**

Los efectos de propagación de las ondas electromagnéticas constituyen un conjunto de fenómenos que describen el comportamiento de dichas ondas al transitar a través de diversos medios. Entre estos efectos se encuentran la reflexión, la refracción, la difracción y el efecto multitrayecto. Cada uno de estos fenómenos tiene la capacidad de modificar la trayectoria, la intensidad y la fase de la onda electromagnética. Estas alteraciones son de particular relevancia, ya que inciden directamente en la calidad y la fiabilidad de las

comunicaciones inalámbricas y de otros sistemas tecnológicos que se fundamentan en la propagación eficiente de ondas (Li et al., 2020).

#### *2.2.1.6.1 Reflexión y refracción*

La reflexión se produce cuando una onda electromagnética encuentra la interfaz entre dos medios distintos, provocando que una porción de la onda sea reflejada hacia el medio original. Conforme a la ley de reflexión, el ángulo con el que la onda incide sobre la interfaz es equivalente al ángulo con el que se refleja. En el contexto de las comunicaciones inalámbricas, la refracción puede influir en la cobertura y la calidad de la señal, particularmente en entornos donde las ondas deben propagarse a través de diversos materiales, como los edificios y otros tipos de barreras (Michael, 2019).

#### *2.2.1.6.2 Difracción*

La difracción constituye un fenómeno físico en el cual una onda electromagnética experimenta una desviación de su trayectoria al interactuar con un obstáculo o una abertura, cuyas dimensiones son comparables a su longitud de onda. La comprensión de la difracción es de suma importancia en el diseño de sistemas de comunicación, ya que proporciona una perspectiva crucial sobre la propagación de ondas en contextos urbanos densamente construidos y otros entornos complejos, donde los edificios y otras estructuras pueden alterar significativamente la trayectoria y la intensidad de las señales electromagnéticas (Li S. et al., 2020).

#### *2.2.1.6.3 Efecto multitrayecto*

El fenómeno conocido como efecto multitrayecto se manifiesta cuando una señal electromagnética alcanza un receptor siguiendo diversas rutas debido a fenómenos físicos como la reflexión, difracción y refracción. Esta pluralidad de caminos puede inducir interferencias, tanto constructivas como destructivas, que repercuten directamente en la calidad de la señal que se recibe. Este efecto representa un desafío significativo en el ámbito

de las comunicaciones móviles y otros sistemas inalámbricos, en los cuales las señales frecuentemente se ven reflejadas por múltiples superficies, tales como edificaciones, el terreno y una variedad de obstáculos, alterando así su trayectoria original y su integridad (Feng et al., 2019).

#### 2.2.1.6.4 Línea de vista

La línea de vista (LOS) representa el trayecto ininterrumpido que conecta un transmisor con un receptor, libre de cualquier tipo de obstrucción que pudiera interferir en la propagación de la onda electromagnética. La transmisión que se realiza bajo esta condición es óptima, pues favorece la maximización tanto de la intensidad como de la calidad de la señal recibida, al reducir significativamente los efectos adversos tales como la reflexión, la difracción y la absorción de la onda. Esta característica es de vital importancia en el ámbito de tecnologías avanzadas, incluyendo pero no limitándose al radar y las comunicaciones por satélite. En dichas aplicaciones, resulta esencial asegurar una ruta despejada entre los dispositivos encargados de la transmisión y la recepción, para garantizar la eficiencia y la fiabilidad de la comunicación (Michael, 2019).

#### 2.2.1.6.5 Pérdidas en el Espacio

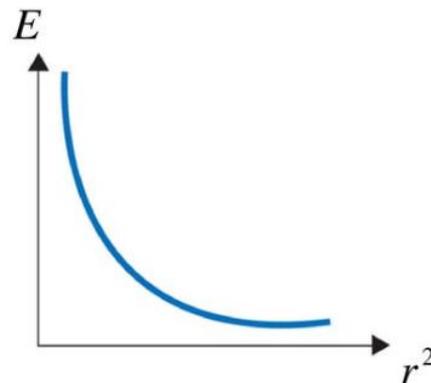
Las pérdidas en el espacio describen la disminución de la intensidad de las ondas electromagnéticas a medida que se alejan de su fuente emisora. Este fenómeno está gobernado por una relación inversamente proporcional al cuadrado de la distancia (Figura 1), y puede ser descrito por la ecuación:

$$E = k_e \cdot \frac{q}{r^2}$$

Donde:

- E: Intensidad del campo eléctrico.
- $k_e$ : Constante de Coulomb.
- q: Carga de la fuente emisora.
- r: Distancia desde la fuente emisora.

**Figura 1.** *Campo Eléctrico vs distancia*



Las pérdidas en el espacio están influenciadas por otros factores, como la absorción atmosférica, donde moléculas presentes en el aire pueden atenuar la señal, y la interferencia por reflexión y difracción, que puede provocar fluctuaciones en la intensidad de la señal. Estos fenómenos resultan especialmente significativos en frecuencias más altas, como las utilizadas en las tecnologías 4G y 5G. La correcta cuantificación de estas pérdidas es esencial para asegurar la calidad del servicio en escenarios complejos, como áreas urbanas densamente pobladas o entornos rurales con grandes distancias entre antenas.

Un estudio reciente realizado por Karimi, M., & Nasiri-Kenari, M. (2011) demuestra cómo las pérdidas en el espacio afectan significativamente la propagación de señales en entornos de visión directa, destacando la importancia de considerar factores como la frecuencia y la distancia en el diseño de sistemas de telecomunicaciones.

### **2.2.1.7 Mapeo electromagnético**

El mapeo electromagnético representa un proceso meticuloso que implica la medición y la representación gráfica de la distribución espacial de los campos electromagnéticos en una región delimitada. Asimismo, las mediciones de campo proporcionan datos empíricos esenciales, mientras que el uso de sensores especializados contribuye a capturar información detallada sobre las características y el comportamiento de los campos electromagnéticos. La integración de estos recursos metodológicos es fundamental para obtener una comprensión exhaustiva y detallada de la dinámica de las ondas electromagnéticas, lo cual es indispensable para el avance tecnológico en el ámbito de las telecomunicaciones (Zhang et al., 2022).

### **2.2.1.8 Zona de radiación**

La zona de radiación designa el área alrededor de una antena en la que predominan las ondas electromagnéticas en forma de radiación. Esta zona se divide en dos regiones diferentes: el campo cercano y el campo lejano. El campo cercano, a menudo denominado zona de Fresnel, es el espacio inmediato a la antena y se distingue por un comportamiento irregular de los campos eléctricos y magnéticos, que no se comportan como ondas planas y presentan una distribución compleja. En este ámbito, la interacción entre la antena y el campo electromagnético es particularmente intensa, lo que implica que los cálculos de campo deben ser ejecutados con un alto grado de precisión, tomando en cuenta meticulosamente la geometría y el diseño específicos de la antena (Li et al., 2020).

#### *2.2.1.8.1 Campo lejano*

En la zona denominada campo lejano, también reconocida como la zona de Fraunhofer, se observa que las ondas electromagnéticas adoptan un comportamiento característico de ondas planas. La relevancia del campo lejano radica en su papel fundamental para el análisis y diseño de sistemas de antenas, puesto que permite la medición

y caracterización precisa de parámetros críticos tales como la ganancia, la directividad y el patrón de radiación, los cuales son indispensables para la optimización del rendimiento de las antenas (Cui et al., 2023).

#### *2.2.1.8.2 Campo cercano*

La zona de Fresnel, comúnmente referida como el campo cercano, constituye la región inmediatamente adyacente a una antena, donde se manifiesta una compleja interacción entre los campos eléctricos y magnéticos. A diferencia de las ondas planas características del campo lejano, en esta área la propagación de los campos es notablemente más intrincada y sujeta a variaciones. La intensidad de la interacción entre la antena y el campo electromagnético es particularmente marcada en el campo cercano, dando lugar a fenómenos significativos de acoplamiento y reactancia que son esenciales en el comportamiento y desempeño de la antena. Dichos efectos no solo son fundamentales para comprender la física subyacente sino que también son críticos en aplicaciones prácticas que demandan un control y precisión exhaustivos del campo electromagnético (Mingyao y Dai, 2022).

Desde una perspectiva alternativa, el campo cercano plantea retos particulares en el ámbito del diseño y funcionamiento de antenas. La inmediata proximidad a la fuente emisora puede resultar en interferencias y efectos colaterales no deseados sobre dispositivos adyacentes. Por ende, se hace imprescindible llevar a cabo mediciones y análisis meticulosos del campo cercano para afinar el diseño de la antena. Adicionalmente, el entendimiento profundo del campo cercano cobra una importancia capital en el desarrollo de aplicaciones que requieren un alcance limitado pero una alta precisión. Esto es particularmente cierto en tecnologías como los sistemas de identificación por radiofrecuencia (RFID) y los sensores biomédicos, donde una comprensión detallada del comportamiento del campo electromagnético es crucial para su eficacia y exactitud operativa (Zhang et al., 2022).

## **2.2.2 Antenas de celulares**

### **2.2.2.1 Principios básicos**

Las antenas, dispositivos ingeniosamente diseñados para la transmisión y recepción de ondas electromagnéticas, operan mediante la conversión de señales eléctricas en ondas electromagnéticas y viceversa. Su función primordial consiste en posibilitar la comunicación inalámbrica a través de la emisión de señales electromagnéticas al espacio y la captación de señales emitidas por otras antenas. Existe una diversidad de antenas, clasificadas según su diseño y propósito específico, que incluye las antenas dipolo, monopolo, parabólicas, de parche y de array. Cada categoría se distingue por atributos particulares que las hacen idóneas para aplicaciones específicas (Yang et al., 2019).

En términos de directividad, ganancia y ancho de banda, los distintos tipos de antenas presentan propiedades únicas. Las antenas dipolo, por ejemplo, son omnidireccionales y emiten señales de manera uniforme en todas las direcciones del plano horizontal, en contraste con las antenas parabólicas, que son altamente direccionales y concentran la energía en un haz focalizado. La selección de una antena se determina en función de variables como la distancia de transmisión, las condiciones ambientales y la frecuencia de operación. Entender los principios fundamentales que rigen las antenas es crucial para el diseño de sistemas de comunicación efectivos y para la optimización del desempeño de las redes inalámbricas (Ojoraoudi et al., 2020).

### **2.2.2.2 Diseño y estructura de antenas celulares**

El diseño y la configuración estructural de las antenas celulares son determinantes para su funcionalidad y eficacia. La geometría de la antena es un factor clave que define su patrón de radiación y su capacidad directiva. Las antenas celulares contemporáneas se

caracterizan por su diseño compacto, adecuado para su integración en dispositivos móviles, lo que implica una ponderación cuidadosa entre el tamaño, la eficiencia y la amplitud de cobertura. Los materiales seleccionados para la fabricación de las antenas influyen significativamente en su desempeño; por ejemplo, se prefieren conductores como el cobre y el aluminio por su reducida resistencia eléctrica, mientras que los materiales dieléctricos se utilizan estratégicamente para modular la propagación de las ondas electromagnéticas y potenciar la eficiencia. Por otro lado, el proceso de diseño de las antenas celulares debe tomar en cuenta aspectos tales como la frecuencia de operación, el ancho de banda deseado y las características específicas del entorno de uso (Hwang et al., 2019).

### **2.2.2.3 Transmisión y recepción de señales**

Comprende una transformación bidireccional entre señales eléctricas y ondas electromagnéticas. Durante la fase de transmisión, una señal eléctrica portadora de información es canalizada hacia la antena, donde se convierte en una onda electromagnética capaz de propagarse a través del espacio. Esta onda electromagnética posee la facultad de recorrer extensas distancias y de atravesar una variedad de medios hasta ser interceptada por una antena receptora. En el momento de la recepción, la onda es capturada por la antena y reconducida a su forma original de señal eléctrica para el posterior procesamiento y extracción de la información contenida (Ojaroudi et al., 2019).

Adicionalmente, el proceso de transmisión y recepción se ve influenciado por variables como la frecuencia de la señal, la potencia de transmisión y las particularidades del entorno. Factores adversos como la atenuación, la interferencia y el ruido son susceptibles de comprometer la calidad de la señal recibida, lo que resalta la importancia de diseñar antenas y sistemas de comunicación que mitiguen estos efectos. Técnicas como la modulación y la codificación, así como el empleo de antenas de diversidad, son

fundamentales para incrementar la fiabilidad y la calidad de las comunicaciones inalámbricas. Por otro lado, la tecnología MIMO (Multiple Input Multiple Output), que facilita el uso simultáneo de múltiples antenas tanto en transmisores como en receptores, se ha establecido como un medio para amplificar la capacidad y la eficiencia de los sistemas de comunicación (Rebato et al., 2019).

### **2.2.3 Modelos matemáticos**

#### **2.2.3.1 Implementación de la Inteligencia Artificial para la predicción matemática**

la capacidad de la IA para aprender y mejorar continuamente su rendimiento a partir de nuevos datos asegura que las predicciones se mantengan relevantes y precisas a lo largo del tiempo (Ravinesh et al., 2020).

#### **2.2.3.2 Aprendizaje automatizado (*Machine Learning*)**

El aprendizaje automatizado, o *machine learning*, ha emergido como una herramienta fundamental en el análisis de datos. El enfoque ha demostrado ser altamente efectivos en diversas aplicaciones, desde la predicción de enfermedades hasta la optimización de procesos industriales. La adaptabilidad y la capacidad de manejar grandes conjuntos de datos son características que hacen del machine learning una técnica invaluable en la predicción matemática (Carolyn et al., 2019).

#### **2.2.3.3 Ecuaciones de Maxwell**

En el ámbito de las antenas celulares, la relevancia de las ecuaciones de Maxwell es incuestionable, ya que proporcionan la base teórica para comprender y proyectar la emisión de ondas electromagnéticas. Dichas antenas son dispositivos que transmutan señales eléctricas en ondas electromagnéticas, facilitando así la propagación a través del espacio y posibilitando la comunicación sin cables (Skouroumounis y Krikidis, 2023).

El proceso analítico y creativo implicado en el diseño de antenas exige la resolución de las ecuaciones de Maxwell, con el fin de elucidar la generación, propagación y distribución espacial de las ondas. Tal proceso demanda una evaluación meticulosa de variables como la configuración geométrica de la antena, la naturaleza de los materiales adyacentes y las especificidades ambientales, elementos todos ellos determinantes para garantizar una transmisión eficaz y una recepción diáfana de las señales (Obukhov, 2022).

#### **2.2.3.4 Fuerza de Lorentz**

La fuerza de Lorentz representa un principio fundamental en el estudio de campos electromagnéticos, describiendo la interacción que se produce cuando una carga eléctrica en movimiento se encuentra con dichos campos (Kiessling, 2020). En términos matemáticos, esta interacción se formula como:

$$F = q(E + v \times B)$$

. Esta fuerza es crucial para comprender la dinámica de partículas cargadas, tales como electrones e iones, ya que influye significativamente en su trayectoria y velocidad al desplazarse a través de campos electromagnéticos. Más allá de su impacto en partículas individuales, la fuerza de Lorentz tiene consecuencias de gran alcance en contextos más amplios, afectando el comportamiento de sistemas complejos como plasmas y la funcionalidad de dispositivos electromecánicos, lo que subraya su importancia en el campo de la física aplicada y la ingeniería electromecánica (Kiessling, 2020).

#### **2.2.3.5 Modelos estadísticos de regresión**

Son herramientas esenciales para el análisis y la predicción de relaciones entre variables. Los modelos de regresión lineal, en particular, son valorados por su simplicidad y facilidad de interpretación, proporcionando una base sólida para la inferencia estadística y la predicción. La regresión lineal permite no solo predecir valores futuros, sino también

entender la influencia de cada variable independiente en la variable dependiente, facilitando así la toma de decisiones informadas (Maulud y Abdulazeez, 2020).

No obstante, se debe considerar la suposición de linealidad entre las variables, lo cual puede no siempre ser aplicable en situaciones del mundo real donde las relaciones pueden ser complejas y no lineales. Además, los modelos de regresión lineal son sensibles a los valores atípicos y pueden no ser robustos en presencia de colinealidad entre las variables independientes. La interpretación de los coeficientes puede ser engañosa si no se cumplen las suposiciones subyacentes del modelo, lo que puede llevar a conclusiones incorrectas (Fernández et al., 2019).

#### **2.2.3.6 Regresiones lineales**

La regresión lineal constituye un método estadístico fundamental en el campo de la matemática computacional y aplicada, se fundamenta en la hipótesis de que es posible representar esta relación a través de una función lineal, es decir, una línea recta dentro de un plano cartesiano (Fernández et al., 2019).

Dentro de este marco, la regresión lineal simple se centra en la correlación entre dos variables, una dependiente, denotada como “y”y, y una independiente, representada por “x”. El propósito de este análisis es identificar la recta óptima que logre minimizar la suma de los cuadrados residuales, es decir, las discrepancias verticales entre los puntos de datos reales y aquellos estimados por el modelo lineal (Fernández et al., 2019).

Por otro lado, la regresión lineal múltiple se extiende para incluir múltiples variables independientes, proporcionando así un enfoque más complejo y detallado para predecir el comportamiento de la variable dependiente. En ambos casos, el análisis de regresión lineal es una herramienta invaluable para la interpretación de datos y la toma de decisiones basada en modelos predictivos precisos y confiables (Maulud y Abdulazeez, 2020).

### 2.2.3.7 Regresión no lineales

La regresión no lineal es una extensión crucial de los modelos de regresión que permite capturar relaciones más complejas entre variables que no pueden ser representadas adecuadamente por una línea recta. Utilizada en diversos campos como la biología, la química y la economía, la regresión no lineal incluye funciones como polinomios de alto grado, exponenciales, logarítmicas y potencias, que pueden modelar datos que muestran curvatura o cambios de comportamiento a diferentes niveles de las variables independientes. Esta flexibilidad proporciona una herramienta potente para ajustarse a fenómenos que presentan dinámicas intrincadas, permitiendo predicciones más precisas y representaciones más realistas de las relaciones subyacentes en los datos (Suzuki, 2020).

#### 2.2.3.7.1 Regresión exponencial

La regresión exponencial es una técnica poderosa para modelar relaciones donde los cambios en la intensidad del campo eléctrico crecen o decrecen a tasas exponenciales. Esta técnica es particularmente útil en contextos donde la señal de la antena decae rápidamente con la distancia o en presencia de obstáculos. Los modelos exponenciales capturan estas dinámicas de manera precisa, permitiendo predecir la intensidad del campo en diferentes ubicaciones del campus y evaluar el impacto de la infraestructura existente en la propagación de la señal (Joudah y Abdulrida, 2022).

#### 2.2.3.7.2 Regresión logarítmica

La regresión logarítmica es ideal para modelar situaciones donde los efectos de las variables independientes disminuyen a medida que aumentan. En el estudio de la intensidad del campo eléctrico, esto podría aplicarse a la disminución del impacto de la distancia a la antena a medida que aumenta. Este tipo de regresión permite capturar dinámicas de retorno

decreciente, proporcionando una herramienta eficaz para el análisis de la propagación de la señal y la optimización de la ubicación de las antenas en el campus (Bates y Tibshirani, 2018).

Por otro lado, la suposición de que los efectos disminuyen logarítmicamente puede no ser válida en todos los casos, lo que puede llevar a ajustes inapropiados del modelo. Además, la transformación logarítmica de los datos puede complicar la interpretación de los resultados, haciendo que sea menos intuitivo para los analistas y decisores sin formación matemática avanzada. La regresión logarítmica también puede ser menos robusta en presencia de valores negativos o cero en las variables independientes, limitando su aplicabilidad en ciertos escenarios (Bates y Tibshirani, 2018).

#### *2.2.3.7.3 Regresión potencial*

La regresión potencial se utiliza para modelar relaciones de tipo potencia, donde una variable depende de otra elevada a una determinada potencia. Este tipo de regresión es útil para capturar las leyes de propagación que siguen una relación de potencia, como la atenuación de la señal en función de la distancia desde la antena. La regresión potencial permite representar estas relaciones de manera precisa, facilitando la predicción de la intensidad del campo eléctrico en diferentes ubicaciones y la evaluación del impacto de los obstáculos físicos en la propagación de la señal (Terza, 2020).

#### *2.2.3.7.4 Regresión polinomiales*

Al incluir términos polinomiales en el modelo, se puede capturar curvaturas y fluctuaciones que los modelos lineales simples no pueden. Esto es particularmente útil en el análisis de la propagación de la señal de las antenas celulares, donde las interacciones con el entorno físico pueden crear patrones complejos en la intensidad del campo. Los modelos polinomiales

permiten hacer predicciones más precisas y representan las variaciones espaciales de manera más realista (Calonico et al., 2022).

#### **2.2.3.8 Predicciones mediante modelos de regresiones**

Las predicciones mediante modelos de regresión son fundamentales para entender y gestionar la intensidad del campo eléctrico generado por las antenas celulares. Estos modelos permiten establecer relaciones cuantitativas entre la intensidad del campo y variables como la distancia a la antena, la potencia transmitida y las características del entorno. Esta capacidad predictiva es crucial para la planificación y la optimización de la red de antenas, asegurando que los niveles de radiación cumplan con los estándares internacionales como los de ICNIRP, y minimizando la exposición innecesaria a la radiación electromagnética en el campus (Qiu et al., 2020).

La integración de técnicas avanzadas, como la regresión múltiple y las transformaciones no lineales, puede mitigar estos problemas, pero también aumenta la complejidad del modelo y la necesidad de una validación rigurosa para asegurar la fiabilidad de las predicciones (Scott y Mustillo, 2021).

### **2.2.4 Normativa internacional ICNIRP**

#### **2.2.4.1 Introducción a la ICNIRP**

La “Comisión Internacional de Protección contra las Radiaciones No Ionizantes” (ICNIRP) es una entidad autónoma que se encarga de definir directrices y recomendaciones respecto a los límites de exposición a radiaciones no ionizantes. Fundada en 1992, la ICNIRP tiene como misión principal proteger la salud pública frente a posibles efectos adversos derivados de la exposición a estas radiaciones. La comisión basa sus directrices en una evaluación

rigurosa y continua de la literatura científica, garantizando que sus recomendaciones se fundamenten en la mejor evidencia disponible (Frank y ICNIRP, 2021).

Por otro lado, la ICNIRP ha sido objeto de críticas debido a su estrecha relación con la industria de las telecomunicaciones y a la financiación de algunos de sus estudios, lo que ha generado preocupaciones sobre posibles conflictos de interés. Algunos expertos argumentan que la independencia de la ICNIRP puede verse comprometida por estas influencias, afectando la imparcialidad de sus recomendaciones. A pesar de estas críticas, la ICNIRP sigue siendo una autoridad respetada en el ámbito de la radiación no ionizante, y sus directrices son adoptadas por numerosos países y organizaciones internacionales (Frank y ICNIRP, 2021).

Igualmente, la ICNIRP enfrenta el desafío de mantenerse al día con los rápidos avances tecnológicos y las nuevas investigaciones científicas. La continua evolución de las tecnologías inalámbricas y la creciente preocupación por los posibles efectos a largo plazo de la exposición a bajas dosis de radiación no ionizante requieren que la ICNIRP revise y actualice constantemente sus directrices. Este proceso de actualización es esencial para garantizar que las recomendaciones sigan siendo pertinentes y efectivas en la protección de la salud pública (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, 2022).

#### **2.2.4.2** Objetivos y alcances

El objetivo principal de la ICNIRP es establecer límites de exposición a las radiaciones no ionizantes que protejan la salud humana de posibles efectos adversos. Estos límites se basan en una evaluación exhaustiva de los estudios científicos disponibles, incluyendo investigaciones epidemiológicas, estudios experimentales y modelos teóricos. La ICNIRP busca identificar los niveles de exposición que pueden causar efectos biológicos perjudiciales y establecer directrices que minimicen estos riesgos, proporcionando un marco

de referencia para la regulación y la gestión de la exposición a radiaciones no ionizantes a nivel global (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, 2020).

Sin embargo, la implementación de estas directrices puede variar significativamente entre diferentes países y regiones, lo que plantea desafíos para la estandarización global de los límites de exposición. Las diferencias en la interpretación de la evidencia científica, las prioridades nacionales y los recursos disponibles pueden llevar a variaciones en cómo se adoptan y aplican las recomendaciones de la ICNIRP. Esta falta de uniformidad puede complicar los esfuerzos para garantizar una protección consistente y equitativa de la salud pública a nivel internacional (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, 2022).

#### **2.2.4.3** Directrices de exposición

Las directrices de exposición de la ICNIRP establecen límites específicos para la intensidad del campo eléctrico, magnético y electromagnético a los que las personas pueden estar expuestas sin riesgo significativo para su salud. Estos límites están diseñados para proteger contra efectos agudos, como el calentamiento de los tejidos, y impactos a largo plazo, como los potenciales riesgos de cáncer. Las directrices se basan en un enfoque de precaución, considerando tanto los efectos térmicos como no térmicos de la radiación, y se actualizan periódicamente para reflejar los últimos avances científicos (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection , 2020).

Sin embargo, la aplicación práctica de estas directrices puede presentar desafíos significativos. En entornos urbanos densamente poblados, la proliferación de dispositivos y antenas celulares puede llevar a situaciones donde los niveles de exposición superan los límites recomendados. La variabilidad en la implementación y el monitoreo de estas directrices entre diferentes jurisdicciones puede resultar en exposiciones inconsistentes y

potencialmente peligrosas. Además, la falta de recursos y la capacitación adecuada en algunas regiones pueden dificultar la aplicación efectiva de las recomendaciones de la ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, 2003).

En este caso, en la tabla 1 se puede evidenciar el grado de exposición a los campos eléctricos y magnéticos, la cual presenta límites superiores para la exposición ocupacional a CEM.

Se registra una variación notable en general, se observa una tendencia de disminución en los valores a medida que aumenta la frecuencia, aunque existen algunas excepciones.

**Tabla 1**

*Niveles de referencia para exposición ocupacional a campos eléctricos y magnéticos (valores rms no perturbados)*

<b>Rango de Frecuencias (MHz)</b>	<b>Intensidad de Campo Eléctrico (Vm-1)</b>	<b>Intensidad de Campo Magnético (Am-1)</b>	<b>Densidad de Flujo Magnético (μT)</b>	<b>Densidad de Potencia (Wm-2)</b>
Hasta 1 Hz	–	1,63 x 10 <sup>5</sup>	2 x 10 <sup>5</sup>	–
1 – 8 Hz	20 000	1,63 x 10 <sup>5</sup> / f <sup>2</sup>	2 x 10 <sup>5</sup> / f <sup>2</sup>	–
8 – 25 Hz	20 000	2 x 10 <sup>4</sup> / f	2,5 x 10 <sup>4</sup> / f	–
0,025 – 0,82 kHz	500 / f	20 / f	25 / f	–
0,82 – 65 kHz	610	24,4	30,7	–
0,065 – 1 MHz	610	1,6 / f	2 / f	–
1 – 10 MHz	610 / f	1,6 / f	2 / f	–
10 – 400 MHz	61	0,16	0,2	10
400 – 2000 MHz	3 f 0,5	0,008 f 0,5	0,01 f 0,5	f / 40
2 - 300 GHz	137	0.36	0.45	50

*Nota.* Tabla construida a partir de la información contemplada del International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (2003).

Sintetizando lo anterior, la tabla 1 demuestra que la relación entre la intensidad del campo y la frecuencia varía según el rango de frecuencias considerado. En muchos casos, se observa una relación inversa, donde la intensidad del campo disminuye a medida que aumenta la frecuencia. Por ejemplo, en frecuencias entre 2 y 300 GHz, la intensidad del campo eléctrico es de 137 V/m, que es notablemente menor que los valores en frecuencias más bajas.

Adicionalmente, existen debates sobre la adecuación de los límites de exposición establecidos por la ICNIRP. Algunos expertos argumentan que los límites actuales no tienen en cuenta suficientemente los efectos biológicos no térmicos y que pueden ser demasiado permisivos para ciertos grupos vulnerables, como los niños y las personas con condiciones de salud preexistentes. Estas preocupaciones subrayan la necesidad de una evaluación continua y un debate científico abierto para asegurar que las directrices de exposición protejan adecuadamente a toda la población (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, 2022).

En la tabla 2, se presentan los niveles de referencia para la exposición de la población a campos eléctricos y magnéticos, mostrando una disposición de valores que cambia según la frecuencia. En las frecuencias más bajas, de hasta 1 Hz, no se determina la intensidad del campo eléctrico, pero se registran valores elevados para la intensidad del campo magnético y la densidad de flujo magnético, lo que sugiere una exposición considerable a campos magnéticos en este intervalo.

**Tabla 2**

*Niveles de referencia para exposición poblacional a campos eléctricos y magnéticos (valores rms no perturbados)*

Rango de Frecuencias	Intensidad de Campo		Densidad de	Densidad de
	Eléctrico (Vm-1)	Intensidad de Campo Magnético (Am-1)	Flujo Magnético ( $\mu$ T)	Potencia (Wm-2)
Hasta 1 Hz	–	3,2 x 104	4 x 104	–
1 – 8 Hz	10 000	3,2 x 104/ f 2	4 x 104/ f 2	–
8 – 25 Hz	10 000	4000/ f	5000/ f	–
0,025 – 0,8 kHz	250 / f	4/ f	5/ f	–
0,8 – 3 kHz	250 / f	5	6,25	–
3 – 150 kHz	87	5	6,25	–
0,15– 1 MHz	87	0,73/ f	0,92 / f	–
1 – 10 MHz	87/ f 0,5	0,73/ f	0,92/ f	–
10 – 400 MHz	28	0,073	0,092	2
400 – 2000 MHz	1,375f 0,5	0,0037f 0,5	0,0046f 0,5	f/ 200
2 - 300 GHz	61	0.16	0.20	10

*Nota.* Tabla construida a partir de la información contemplada del International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (2003).

Según los datos presentados en la tabla 2, se puede deducir que, a medida que la frecuencia aumenta, desde 1 a 8 Hz y de 8 a 25 Hz, la intensidad del campo eléctrico permanece constante; primero, en relación al cuadrado de la frecuencia, y luego, de manera lineal. Esto indica que la exposición magnética disminuye de forma proporcional al incremento de la frecuencia. Sin embargo, en el rango de 0,025 a 3 kHz, la intensidad del campo eléctrico disminuye de manera inversa a la frecuencia, lo que sugiere una reducción de la exposición a medida que la frecuencia aumenta.

De forma adicional, en el intervalo de 3 kHz a 1 MHz, la intensidad del campo eléctrico se mantiene constante lo que indica una reducción de la exposición en este rango. Por último, al considerar las frecuencias que oscilan entre 400 MHz y 300 GHz, tanto la intensidad del campo eléctrico como la del campo magnético, junto con la densidad de flujo magnético, experimentan un incremento que es proporcional a la raíz cuadrada de la frecuencia. Asimismo, la densidad de potencia aumenta de manera lineal con la frecuencia, sugiriendo así un incremento en la exposición a la energía radiada en este rango de frecuencias.

#### **2.2.4.4 Fundamentos científicos**

Las pautas de la ICNIRP se fundamentan en un análisis minucioso de la literatura científica, que incluye estudios epidemiológicos, experimentos de laboratorio y modelos teóricos. Estos trabajos exploran los efectos biológicos asociados con la exposición a radiaciones no ionizantes, considerando tanto los impactos térmicos como los no térmicos. Con base en esta información, la ICNIRP identifica los niveles de exposición que podrían ser dañinos para la salud humana y establece límites de exposición con el objetivo de minimizar estos riesgos. La revisión y actualización periódica de las directrices aseguran que reflejen los últimos avances científicos y tecnológicos (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, 2003).

La interpretación de los fundamentos científicos puede ser objeto de controversia. Algunos investigadores critican que la ICNIRP se enfoca predominantemente en los efectos térmicos, subestimando los posibles efectos no térmicos de la exposición a bajas dosis de radiación no ionizante. Esta visión puede limitar la efectividad de las directrices en proteger contra todos los posibles riesgos para la salud. De igual manera, la variabilidad en la sensibilidad individual a las radiaciones no ionizantes plantea desafíos adicionales para establecer límites

de exposición universales que sean seguros para toda la población (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, 2022).

#### **2.2.4.5** Parámetros de evaluación

Para evaluar la conformidad con las directrices de exposición, la ICNIRP define varios parámetros clave, como la densidad de potencia, la intensidad del campo eléctrico y magnético, y el (SAR). Estos parámetros permiten una evaluación cuantitativa y comparativa de los niveles de exposición en diferentes entornos y situaciones. La densidad de potencia mide la cantidad de energía electromagnética que pasa a través de una unidad de área, mientras que la SAR cuantifica la energía absorbida por el tejido humano. La ICNIRP también proporciona metodologías y procedimientos estandarizados para medir estos parámetros, asegurando la consistencia y la fiabilidad de las evaluaciones (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, 2022).

Es importante acotar que, la medición precisa de estos parámetros puede ser técnica y logísticamente desafiante, dado que las condiciones ambientales, como la presencia de estructuras metálicas, la variabilidad temporal de las señales y la complejidad del entorno, pueden afectar significativamente las mediciones. Sin embargo, la interpretación de los resultados requiere una comprensión detallada de los principios físicos y biológicos subyacentes, lo que puede ser una barrera para la implementación efectiva en entornos con recursos limitados. A pesar de estos desafíos, los parámetros de evaluación de la ICNIRP son esenciales para garantizar la seguridad y la conformidad con los límites de exposición; en este caso se destaca las nuevas tecnologías y las aplicaciones emergentes, como las comunicaciones 5G, introducen nuevas dinámicas y patrones de exposición que pueden no estar completamente cubiertos por los métodos de evaluación tradicionales. Esto subraya la necesidad de una vigilancia continua y de la actualización de los parámetros de evaluación

para asegurar que se aborden adecuadamente los nuevos riesgos y que las directrices de exposición sigan siendo pertinentes y efectivas (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection , 2020).

#### **2.2.4.6 Modelos matemáticos en la ICNIRP**

Los modelos matemáticos son herramientas fundamentales en la formulación de las directrices de la ICNIRP, permitiendo la simulación y el análisis de la distribución de los campos eléctricos y magnéticos en el cuerpo humano. Estos modelos ayudan a predecir la absorción de energía y los efectos biológicos asociados, proporcionando una base cuantitativa para establecer límites de exposición seguros. Utilizando métodos avanzados como los elementos finitos (FEM) y las simulaciones de cuerpos completos, los modelos matemáticos permiten una comprensión detallada de cómo diferentes frecuencias y intensidades afectan a los tejidos humanos, contribuyendo significativamente a la protección de la salud pública (Frank y ICNIRP, 2021).

## **Capítulo 3**

### **Diseño Metodológico**

#### **3.1 Enfoque de Investigación**

La presente investigación tiene un enfoque cuantitativo, basándose primordialmente en la medición y análisis metódico de datos numéricos que describen la intensidad del campo eléctrico originado por antenas celulares. Dicho enfoque cuantitativo es imperativo, ya que confiere la capacidad de realizar una evaluación objetiva y minuciosa de las variables pertinentes. Además, este método posibilita la formulación de predicciones y la extracción de conclusiones fundamentadas en sólida evidencia numérica y análisis estadístico. A través de este rigor metodológico, se buscó alcanzar una comprensión más profunda del comportamiento del campo eléctrico, lo cual es esencial para el desarrollo de modelos matemáticos precisos en el ámbito de las telecomunicaciones.

#### **3.2 Diseño de la Investigación**

El diseño del presente estudio se estipuló bajo un carácter cuasi experimental, implicando la ejecución de pruebas controladas con el fin de comprobar la funcionalidad adecuada del modelo matemático propuesto. La fase cuasi experimental es crucial, pues facilita la validación de la efectividad y la precisión del modelo en la predicción de la intensidad del campo eléctrico generado por antenas celulares. Adicionalmente, el diseño adoptó una naturaleza cuasi experimental, reconociendo que, si bien es factible llevar a cabo mediciones del campo eléctrico en distintas localizaciones y tiempos, la asignación aleatoria de individuos o puntos de exposición se ve restringida por limitaciones de índole práctica y ética. Este enfoque permitió no solo confirmar la viabilidad del modelo sino también asegurar su aplicabilidad en escenarios reales.

### **3.3 Tipo de Investigación**

El estudio en cuestión se caracterizó por desarrollar un tipo de investigación correlacional, orientado a discernir y establecer conexiones significativas entre las variables que inciden en la intensidad del campo eléctrico emanado de las antenas celulares. Tal enfoque fue esencial en la identificación de patrones y tendencias subyacentes en el conjunto de datos recabados, lo cual es fundamental para la formulación de predicciones acerca de la intensidad del campo eléctrico bajo una diversidad de escenarios y condiciones. Este método correlacional no solo facilitó una comprensión más amplia de las relaciones entre las variables, sino que también es esencial para el avance del modelamiento matemático que busca representar con precisión el comportamiento del campo eléctrico en las antenas celulares.

### **3.4 Niveles de Investigación**

La investigación que se llevó a cabo se posicionó en un nivel descriptivo, orientada a detallar y examinar las características y las interrelaciones entre las variables relevantes. Se enfocó en la descripción y análisis sin ejercer manipulación directa sobre las condiciones ambientales. Este enfoque permitió una observación meticulosa de los fenómenos tal como se presentaban en su estado natural, proporcionando así una base sólida para la comprensión del comportamiento de la intensidad del campo eléctrico generado por las antenas celulares. La naturaleza descriptiva de este estudio fue esencial para establecer un fundamento empírico sobre el cual se podrían construir investigaciones futuras, posibilitando un análisis más profundo y una modelización matemática más precisa.

### 3.5 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

En el estudio realizado, se empleó la técnica de análisis de regresiones lineales y no lineales, la cual consistió en ajustar modelos matemáticos no lineales a los datos históricos recabados. Este proceso fue esencial para describir y predecir la relación entre la intensidad del campo eléctrico y las variables predictoras de interés, tales como la distancia a las antenas celulares. Los modelos de regresión no lineales demostraron ser particularmente idóneos para capturar las relaciones complejas inherentes a los fenómenos estudiados, que no podían ser adecuadamente representados mediante modelos lineales simples. Estos modelos resultaron ser herramientas valiosas, especialmente en escenarios caracterizados por saturación, crecimiento exponencial o interacciones no lineales entre las variables en cuestión.

Los instrumentos empleados en este estudio consisten en pruebas de regresión no lineales, las cuales se aplicaron para modelar y predecir la intensidad del campo eléctrico generado por las antenas celulares en la ESPOCH. Dentro de este conjunto de pruebas, la Regresión Exponencial fue aplicada para captar las dinámicas de crecimiento o decrecimiento exponencial que se presentan entre la intensidad del campo eléctrico y las variables predictoras, como la proximidad a las antenas.

Con el propósito de abordar fenómenos donde la intensidad del campo eléctrico disminuye logarítmicamente con la distancia, se incorporó la Regresión Logarítmica. Esta técnica resultó ser especialmente pertinente para describir comportamientos donde la variación de la intensidad es inversamente proporcional al logaritmo de la distancia.

Asimismo, se recurrió a la Regresión Potencial para elucidar las relaciones en las que la intensidad del campo eléctrico varía de forma no lineal con respecto a las variables independientes, un escenario común en la propagación de ondas electromagnéticas. Finalmente, la Regresión Polinomial se utilizó para representar las complejidades de las

relaciones no lineales entre la intensidad del campo eléctrico y las variables predictoras, tales como la potencia de las señales emitidas y la configuración del terreno.

Estas técnicas seleccionadas proveyeron una representación matemática robusta y detallada de las interacciones entre las variables de interés, lo que permitió generar predicciones precisas sobre la intensidad del campo eléctrico en una variedad de escenarios y condiciones dentro del área de estudio.

Por otra parte para la obtención y cálculo de los datos se utilizó el equipo de medición Narda SRM-3006, es un analizador de campo electromagnético especializado en la medición de niveles de radiación en una amplia gama de frecuencias. Este equipo es altamente valorado por su precisión y fiabilidad en la detección de campos electromagnéticos, desde frecuencias muy bajas hasta las utilizadas en telecomunicaciones móviles. Sus características clave incluyen:

- Rango de Frecuencia: Desde 9 kHz hasta 6 GHz, cubriendo una amplia gama de aplicaciones.
- Capacidad de Medición: Mide tanto el campo eléctrico como el campo magnético, permitiendo una evaluación integral del entorno electromagnético.
- Calibración Automática: Asegura mediciones precisas y confiables mediante la auto-calibración antes de cada medición.
- Portabilidad: Su diseño compacto y ligero facilita el uso en campo, permitiendo mediciones en diferentes ubicaciones y condiciones.

Igualmente se empleó el instrumento de medición de EME Spy-200 es otro dispositivo de alta precisión utilizado para medir niveles de radiación electromagnética. Este equipo es conocido por su capacidad para realizar mediciones continuas y almacenar datos a lo largo

del tiempo, lo que es crucial para estudios prolongados. Sus principales características incluyen:

- **Rango de Frecuencia:** Adecuado para mediciones en bandas utilizadas por dispositivos móviles, incluyendo GSM, UMTS, LTE, y Wi-Fi.
- **Capacidad de Registro:** Permite la grabación de datos a intervalos regulares, facilitando el análisis de variaciones temporales en los niveles de exposición.
- **Facilidad de Uso:** Diseñado para ser fácil de operar, con interfaces intuitivas y opciones de configuración flexibles.
- **Almacenamiento de Datos:** Capacidad para almacenar grandes volúmenes de datos, que pueden ser exportados para análisis posteriores.

Como parte final, se empleó el software R para el procesamiento de la información, siendo este un lenguaje de programación ampliamente utilizado para el análisis estadístico y gráfico de datos. Es especialmente valioso en investigaciones científicas debido a su flexibilidad y la extensa colección de paquetes disponibles para análisis de datos, modelado estadístico y visualización. Las características más destacadas de R incluyen:

- **Análisis Estadístico Avanzado:** Ofrece una amplia gama de técnicas estadísticas, desde análisis descriptivo hasta modelos complejos de regresión y pruebas de hipótesis.
- **Visualización de Datos:** Proporciona herramientas poderosas para la creación de gráficos y visualizaciones detalladas, ayudando a interpretar los resultados de manera clara y efectiva.
- **Manipulación de Datos:** Con librerías como dplyr, permite la manipulación eficiente de grandes conjuntos de datos, facilitando tareas como filtrado, transformación y resumen de datos.

- Comunidad y Paquetes: R cuenta con una comunidad activa que contribuye con paquetes adicionales para casi cualquier tipo de análisis, incluyendo el modelado de campos electromagnéticos y pruebas de normalidad de residuos.

### **3.6 Técnicas para el Procesamiento e Interpretación de Datos**

Las técnicas utilizadas para el procesamiento e interpretación de datos en este estudio se centraron en métodos avanzados de análisis estadístico, combinados con herramientas específicas de medición y software de análisis de datos. En primer lugar, se definieron las frecuencias medidas, seleccionándose la banda de GSM-850 MHz como objeto de estudio. Para realizar las mediciones, se utilizaron equipos de alta precisión como el Narda SRM-3006 y el EME Spy-200, ambos especializados en la medición de niveles de radiación electromagnética en diversas frecuencias. El software R se empleó para el análisis de los datos recolectados, debido a su capacidad para manejar grandes volúmenes de datos y realizar análisis estadísticos complejos.

El procedimiento de medición de campos electromagnéticos comenzó con una cuidadosa preparación y calibración de los equipos. El Narda SRM-3006 fue configurado para detectar la frecuencia de 850 MHz, que corresponde a la banda GSM utilizada en comunicaciones móviles. Se realizaron mediciones a una altura de 150 cm para simular la exposición al nivel de la cabeza de una persona promedio. Cada sesión de medición duró 6 minutos para capturar variaciones temporales en la intensidad del campo electromagnético. Las mediciones se realizaron tres veces al día —a las 9:00, 12:00 y 21:00 horas— para capturar las variaciones diurnas, durante un período de 34 días consecutivos, resultando en un total de 102 mediciones.

Durante cada sesión de medición, se registraron detalladamente los valores pico y promedio del campo electromagnético. Además, se tomaron fotografías para contextualizar las

condiciones del entorno. Los datos obtenidos incluyeron específicamente la frecuencia medida de 850 MHz (GSM). Estos datos fueron organizados y analizados utilizando el software R. Un análisis exploratorio inicial se llevó a cabo para entender la distribución y características de las mediciones, utilizando la librería dplyr, que facilitó la manipulación y transformación de datos.

De esta forma, se presenta en la tabla 3 la información referente a la medición de los campos electromagnéticos obtenidos mediante los equipos de medición señalados y en conjunto con el procedimiento explicado anteriormente:

**Tabla 3:** *Datos de medición del campo electromagnético*

<b>Día</b>	<b>Distancia</b>	<b>Intensidad</b>	<b>Hora</b>
1	40	1,356	Mañana
1	40	1,1565	Tarde
1	40	0.85210	Noche
2	45	0.99000	Mañana
2	45	0.90654	Tarde
2	45	0.89970	Noche
3	50	0.82410	Mañana
3	50	0.85200	Tarde
3	50	0.89006	Noche
4	55	0.85320	Mañana
4	55	0.84300	Tarde
4	55	112.480	Noche
5	55	0.65010	Mañana
5	60	0.85350	Tarde
5	60	0.89430	Noche
6	60	0.80430	Mañana
6	70	0.72560	Tarde
6	70	0.89260	Noche
7	70	0.82390	Mañana
7	70	0.55540	Tarde
7	75	0.78600	Noche
8	75	0.76520	Mañana
8	75	0.71822	Tarde
8	80	0.71690	Noche
9	80	0.61242	Mañana

<b>Día</b>	<b>Distancia</b>	<b>Intensidad</b>	<b>Hora</b>
9	80	0.52050	Tarde
9	90	0.69950	Noche
10	90	0.69050	Mañana
10	90	0.68110	Tarde
10	90	0.50860	Noche
11	90	0.51500	Mañana
11	95	0.70970	Tarde
11	95	0.67870	Noche
12	95	0.65090	Mañana
12	95	0.51250	Tarde
12	100	0.65290	Noche
13	100	0.60780	Mañana
13	100	0.56840	Tarde
13	100	0.80430	Noche
14	107	0.35540	Mañana
14	110	0.54173	Tarde
14	110	0.51526	Noche
15	110	0.32560	Mañana
15	110	0.65250	Tarde
15	120	0.55215	Noche
16	120	0.48265	Mañana
16	120	0.68054	Tarde
16	120	0.30540	Noche
17	120	0.22565	Mañana
17	130	0.50710	Tarde
17	130	0.43520	Noche
18	130	0.37000	Mañana
18	140	0.45526	Tarde
18	140	0.38520	Noche
19	140	0.25654	Mañana
19	150	0.30250	Tarde
19	150	0.37250	Noche
20	150	0.21050	Mañana
20	160	0.35360	Tarde
20	160	0.41650	Noche
21	160	0.27030	Mañana
21	170	0.28690	Tarde
21	170	0.25324	Noche
22	170	0.18560	Mañana
22	180	0.30170	Tarde
22	180	0.24650	Noche
23	180	0.21580	Mañana
23	190	0.15480	Tarde
23	190	0.23540	Noche

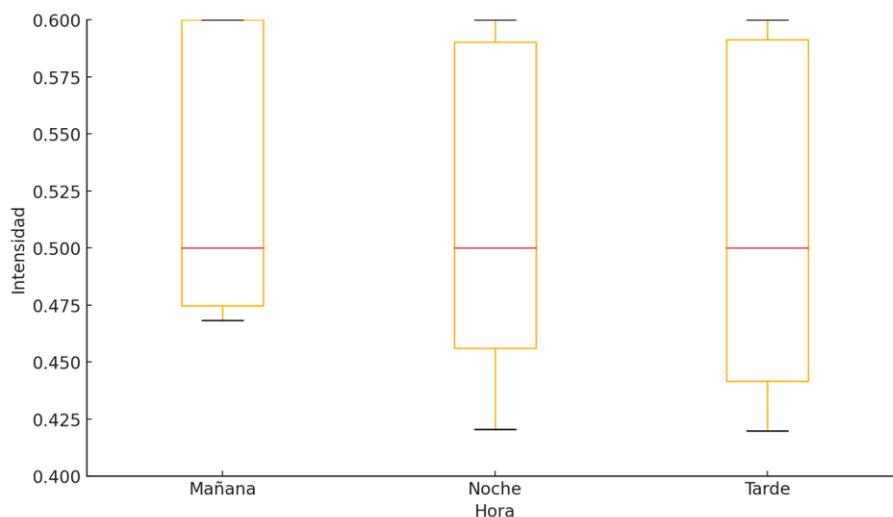
<b>Día</b>	<b>Distancia</b>	<b>Intensidad</b>	<b>Hora</b>
24	190	0.30220	Mañana
24	195	0.16980	Tarde
24	195	0.26700	Noche
25	195	0.10070	Mañana
25	200	0.15950	Tarde
25	200	0.17880	Noche
26	200	0.20580	Mañana
26	205	0.15690	Tarde
26	205	0.20640	Noche
27	205	0.10560	Mañana
27	210	0.12620	Tarde
27	210	0.16000	Noche
28	210	0.08050	Mañana
28	215	0.14610	Tarde
28	215	0.19230	Noche
29	215	0.25580	Mañana
29	215	0.07520	Tarde
29	220	0.10520	Noche
30	220	0.15652	Mañana
30	220	0.12052	Tarde
30	225	0.09772	Noche
31	225	0.14696	Mañana
31	225	0.17055	Tarde
31	230	0.12980	Noche
32	230	0.15260	Mañana
32	230	0.10870	Tarde
32	230	0.20550	Noche
33	235	0.18970	Mañana
33	235	0.15720	Tarde
33	235	0.09540	Noche
34	240	0.06961	Mañana
34	240	0.16010	Tarde
34	240	0.13210	Noche

Se realizó un diagrama de cajas (Figura 2) para analizar la distribución de las mediciones de intensidad del campo electromagnético en tres periodos del día: mañana, tarde y noche. Este análisis permitió visualizar las características principales de las distribuciones, incluyendo

la mediana, los rangos intercuartílicos (IQR) y los valores extremos. Los resultados del gráfico muestran que las medianas de las tres categorías están alineadas, los rangos intercuartílicos son similares, y los valores máximos y mínimos están dentro de rangos comparables.

Esto sugiere que los datos de los tres periodos del día pueden considerarse homogéneos en términos estadísticos. Por lo tanto, se procedió a realizar un único análisis consolidado de las mediciones, evitando segmentaciones innecesarias y facilitando la interpretación global de los resultados.

**Figura 2.** Diagrama de Cajas de la Intensidad del Campo Electromagnético por Periodo del Día



Se emplearon diferentes técnicas de modelado matemático para establecer la relación entre la intensidad del campo eléctrico y la distancia a la fuente de radiación. En este análisis, la intensidad del campo eléctrico se consideró como la variable dependiente, mientras que la distancia fue tratada como la variable independiente. Se seleccionaron y compararon varios modelos de regresión, tanto lineales como no lineales, incluyendo modelos exponenciales, logarítmicos, de potencia, inversos y polinomiales de diferentes grados. Se evaluó el porcentaje de precisión de cada modelo para determinar el que mejor se ajustaba a los datos.

Además, se realizó un análisis de residuos para evaluar la idoneidad del modelo seleccionado. Utilizando la librería nortest, se llevaron a cabo pruebas de normalidad en los residuos del modelo lineal, asegurando que los supuestos del modelo fueran válidos. Con el modelo de regresión que presentó el mejor ajuste, se realizaron predicciones para nuevas distancias.

Finalmente, los datos recolectados se compararon con los límites de exposición recomendados por la Comisión Internacional sobre la Protección contra las Radiaciones No Ionizantes (ICNIRP). Este análisis permitió evaluar la conformidad de los niveles de exposición medidos con respecto a las normativas internacionales. La interpretación de los resultados se llevó a cabo con un enfoque crítico, considerando tanto las implicaciones prácticas como teóricas de los hallazgos y su alineación con el marco teórico previamente establecido. Esto garantizó que las conclusiones del estudio fueran relevantes y aplicables, asegurando la relevancia y aplicabilidad de la investigación.

## Capítulo 4

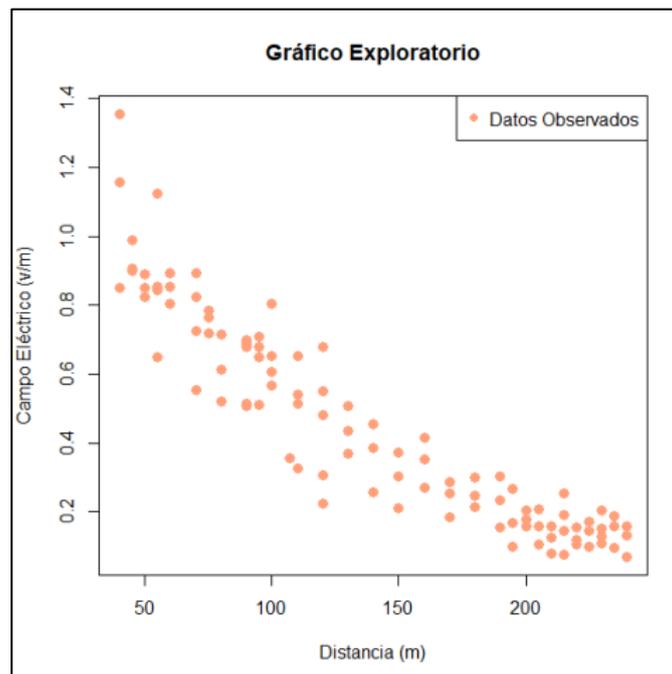
### Análisis y Discusión de los Resultados

#### 4.1 Análisis Descriptivo de los Resultados

##### 4.1.1 Regresión exponencial

La figura 3 se muestra los datos de la intensidad del campo eléctrico y esto disminuye a medida que aumenta la distancia desde la fuente (antena celular). Esta tendencia es consistente con la teoría de que la intensidad del campo eléctrico generado por una antena disminuye con la distancia.

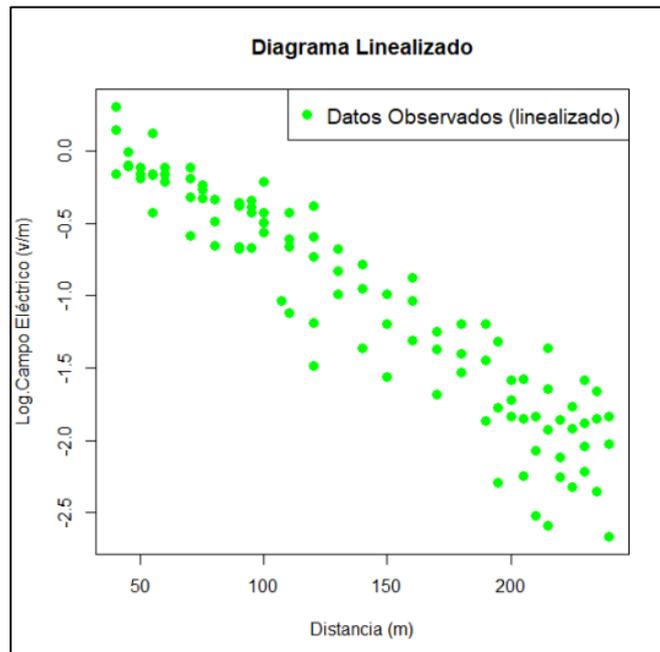
**Figura 3:** Mediciones Observados mediante regresión exponencial



La figura 4 muestra un gráfico de dispersión. Los datos transformados logarítmicamente muestran una disminución lineal del logaritmo del campo eléctrico con respecto a la distancia. Esto indica que la relación original entre la intensidad del campo eléctrico y la distancia es exponencial. Este modelo transformado y linealizado puede ser utilizado para evaluar y predecir la exposición a campos eléctricos en diferentes ubicaciones dentro de la

ESPOCH, proporcionando una herramienta útil para la gestión y mitigación de la exposición.

**Figura 4:** Mediciones observadas linealizadas



### Análisis de las variables

El modelo de regresión lineal ajustado para la variable transformada logarítmicamente del campo eléctrico es:

$$\text{Log (Campo Eléctrico)} = 0,49608338 - 0,01107494 \times \text{distancia}$$

Deshaciendo la transformación se obtiene el siguiente modelo exponencial ajustado.

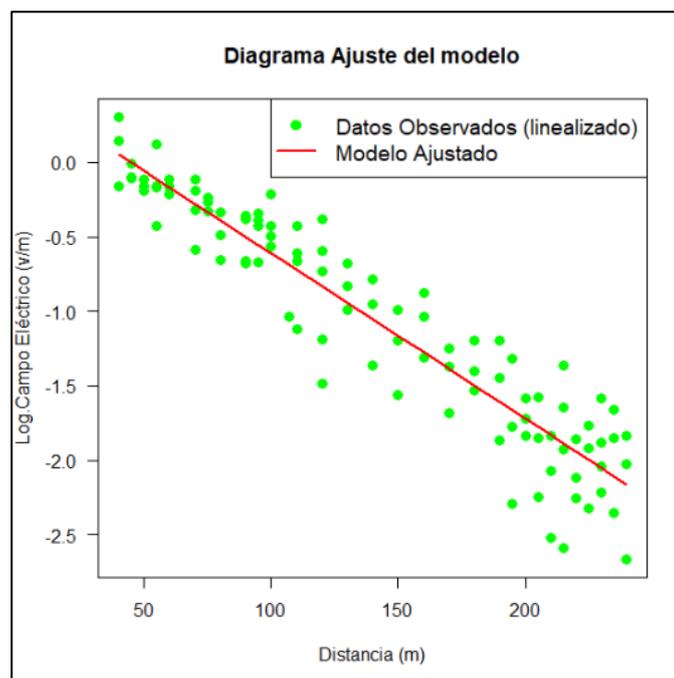
$$\text{Campo Eléctrico} = 1,642276 \times e^{-0,01107494 \times \text{distancia}}$$

Con un coeficiente de determinación  $R^2 = 0,8844$  y un p-valor  $2,2e-16$ , este modelo es altamente significativo dado que tiene una explicación del 88.44% de la variabilidad en los datos observados.

**Tabla 4:** *Ajuste del modelo*

Términos	Valores estimados	Error estándar	Estadístico	P-valor	IC inferior	IC superior
<b>Intercept</b>	0,49608338	0,0616363636	8,04855	1,787011e- 12	0,37379859	0,61836817
<b>Distancia</b>	-0,01107494	0,0004004956	-27,65309	1,213051e- 48	-0,01186951	-0,01028037

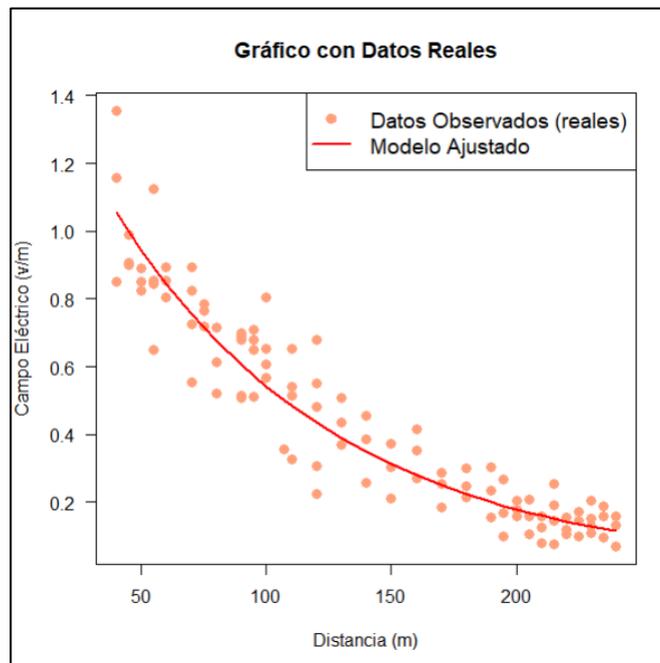
En este caso la tabla 4 detalla que, el valor estimado del intercepto es 0.49608338, lo que representa el logaritmo del campo eléctrico cuando la distancia es cero. El coeficiente de la distancia es -0.01107494, indicando que por cada metro adicional de distancia, el logaritmo del campo eléctrico disminuye en 0.01107494 unidades. Los p-valores extremadamente bajos (menores al 5%) para ambos términos indican que las variables son estadísticamente significativas y contribuyen de manera importante al modelo.

**Figura 5:** *Ajuste del modelo de regresión exponencial*

La figura 5 muestra una disminución lineal del logaritmo del campo eléctrico con respecto a la distancia, esto demuestra que la relación original entre la intensidad del campo eléctrico y la distancia sigue un patrón exponencial. La cercanía de los puntos de datos medidos a la línea del modelo ajustado sugiere que este modelo tiene un alto grado de precisión y puede predecir con exactitud la intensidad del campo eléctrico en función de la distancia.

La figura 6 ilustra que la curva correspondiente al "Modelo Ajustado" se alinea de manera precisa con los puntos de datos observados, lo que evidencia un buen ajuste del modelo de regresión exponencial a los datos reales. Esta alineación sugiere que el modelo resulta apropiado para describir la relación existente entre la distancia y la intensidad del campo eléctrico. Asimismo, los datos indican una reducción en la intensidad del campo eléctrico conforme aumenta la distancia desde la antena celular, lo cual es coherente con la teoría que postula que la intensidad del campo eléctrico disminuye exponencialmente con la distancia.

**Figura 6 :** *Mediciones reales de la de regresión exponencial*



### **Predicciones de datos nuevos con intervalos de confianza y predicción**

La tabla 5 presenta los intervalos de confianza al 95% para las predicciones del campo eléctrico a dos distancias específicas: 10 metros y 250 metros. Los intervalos de confianza proporcionan un rango dentro del cual se espera que se encuentre el verdadero valor del campo eléctrico con un 95% de certeza.

Por ello, a una distancia de 10 metros, el modelo predice que la intensidad del campo eléctrico es aproximadamente 1.47 V/m. El intervalo de confianza al 95% indica que el verdadero valor del campo eléctrico se encuentra entre 1.31 V/m y 1.65 V/m. Esto sugiere una alta precisión en la predicción del modelo para esta distancia cercana. También, a una distancia de 250 metros, el modelo predice que la intensidad del campo eléctrico es aproximadamente 0.103 V/m. El intervalo de confianza al 95% indica que el verdadero valor del campo eléctrico se encuentra entre 0.093 V/m y 0.114 V/m. Aunque la intensidad del campo es mucho menor a esta distancia, el intervalo de confianza sigue siendo estrecho, lo que indica una buena precisión del modelo incluso a distancias mayores.

**Tabla 5:** *Intervalos de confianza del modelo exponencial*

<b>Número</b>	<b>Nueva distancia</b>	<b>Campo eléctrico (predicción)</b>	<b>IC Inferior</b>	<b>IC Superior</b>
<b>1</b>	10	1.4701052	1,31024950	1,6494640
<b>2</b>	250	0,1030386	0,09309921	0,1140391

En este mismo ámbito, para la tabla 6 el análisis fue realizado mediante intervalos de confianza con media condicionada al 95% de confianza, para distancias (10,250). En tal

sentido, la distancia de 10 metros, el modelo predice que la intensidad del campo eléctrico es aproximadamente 1.47 V/m. El intervalo de predicción al 95% indica que los valores futuros del campo eléctrico se encontrarán entre 0.87 V/m y 2.50 V/m. Este rango más amplio refleja la variabilidad esperada en las mediciones futuras y proporciona una medida de la incertidumbre en las predicciones. No obstante, Los intervalos de predicción al 95% para las predicciones del campo eléctrico a 10 metros y 250 metros muestran que el modelo exponencial ajustado es capaz de proporcionar rangos razonables para los valores futuros del campo eléctrico. La amplitud de los intervalos de predicción refleja la variabilidad esperada en las mediciones futuras y proporciona una medida de la incertidumbre en las predicciones, lo cual es crucial para evaluar la exposición a campos eléctricos en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

**Tabla 6:** *Intervalos de predicción*

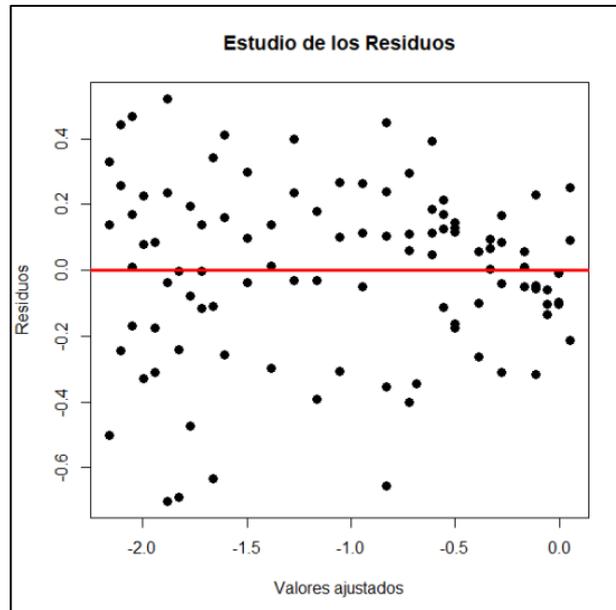
<b>Número</b>	<b>Nueva distancia</b>	<b>Campo eléctrico (predicción)</b>	<b>IP Inferior</b>	<b>IP Superior</b>
<b>1</b>	10	1.4701052	0,86572384	2,4964189
<b>2</b>	250	0,1030386	0,06084835	0,1744822

#### **Análisis residual del modelo ajustado**

En la figura 7 se observa que los residuos son heterocedásticos y no tiene dependencia. La dispersión de los residuos no es constante a lo largo de los valores ajustados, lo que indica heterocedasticidad. Esto significa que la variabilidad de los residuos cambia con el nivel de

los valores ajustados, lo cual puede afectar la validez de las inferencias estadísticas del modelo.

**Figura 7: Homocedasticidad e independencia**

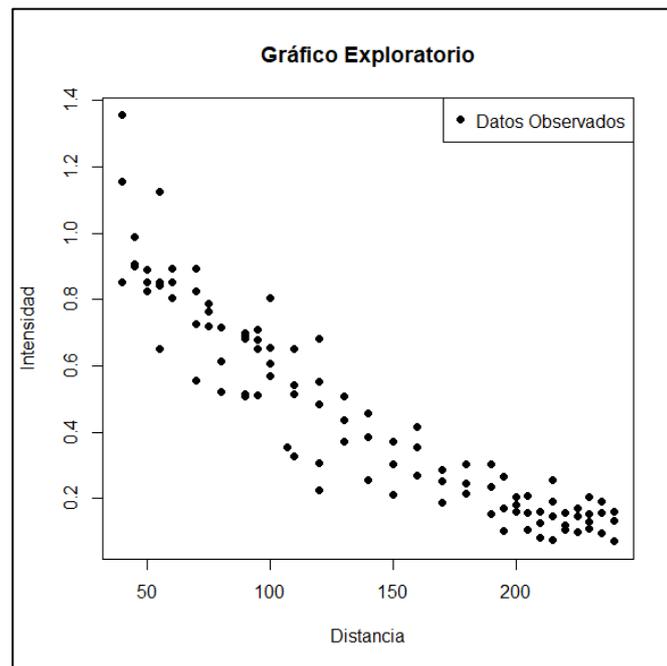


Con el estadístico de Lilliefors  $D= 0,07694$  y  $p\text{-value}= 0,1449$  mayor a  $0,05$ , se acepta la normalidad de los residuos.

#### **4.1.2 Regresión Lineal**

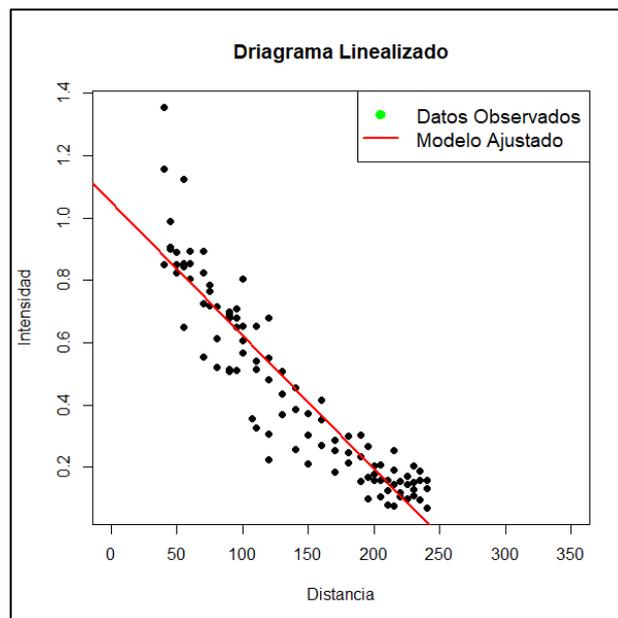
En la figura 8 se observa que los datos tienen una dependencia decreciente, por lo que los datos observados indican que a medida que la distancia aumenta, la intensidad disminuye. Esta tendencia decreciente es consistente con la teoría de que la intensidad de un campo eléctrico disminuye con la distancia desde la fuente.

Figura 8: *Mediciones exploratorias de la regresión lineal*



Por consiguiente, los cálculos realizados por el ajuste del modelo fueron realizados mediante la siguiente fórmula: ***Intesidad* = 1,1788419 – 0,00480157 × *Distancia***.

Figura 9: *Diagrama linealizado*



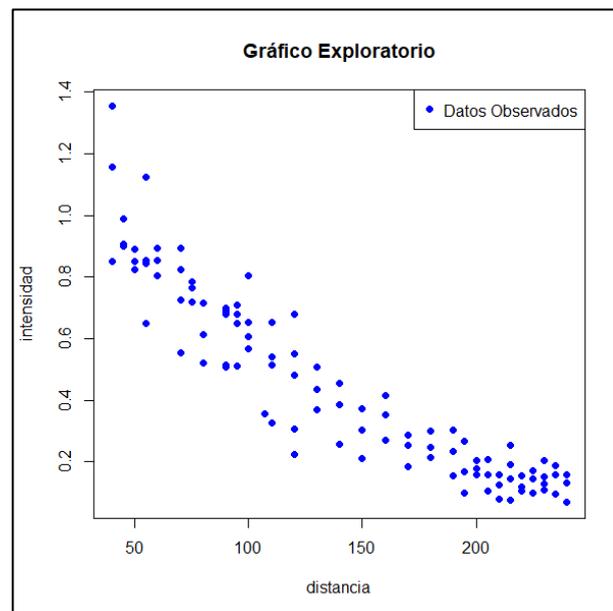
Seguidamente, en la figura 9 revela una clara tendencia decreciente en la información obtenida, lo que sugiere que la intensidad del campo eléctrico disminuye conforme aumenta la distancia. Esta relación linealizada indica una reducción constante en la intensidad a medida que la distancia se incrementa. De acuerdo al valor de  $R^2$  se obtuvo un 60,97% de explicación y un error estándar residual de 0,2479.

### 4.1.3 Regresión No lineal

#### 4.1.3.1 Modelo Inverso

Este modelo de regresión no lineal inversa puede ser utilizado para predecir la intensidad del campo eléctrico a diferentes distancias de la antena celular:

**Figura 10:** Mediciones exploratorias del modelo inverso



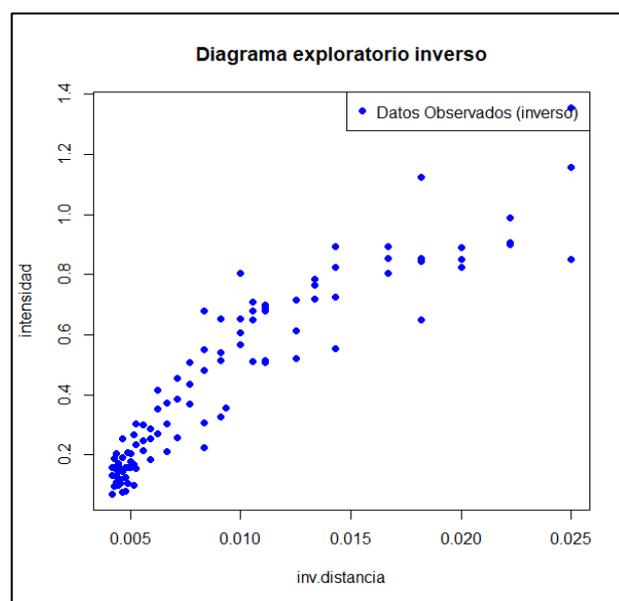
La tabla 7 presenta los resultados de un modelo de regresión no lineal inversa, donde la variable dependiente (intensidad) se ha transformado utilizando el inverso de la distancia. Los términos incluyen el intercepto y el inverso de la distancia, junto con sus valores

estimados, errores estándar y p-valores, el intercepto representa el valor de la intensidad cuando el inverso de la distancia es cero, el p-valor extremadamente bajo indica que el intercepto es altamente significativo, el coeficiente del inverso de la distancia es negativo, lo que indica que a medida que la distancia aumenta (y su inverso disminuye), la intensidad disminuye. El p-valor extremadamente bajo sugiere que esta variable es altamente significativa en el modelo. El valor de ( $R^2 = 0.7203$ ) indica que el modelo tiene una explicación de 72.03% de la variabilidad en los datos observados. Esto sugiere que el modelo tiene un buen ajuste, aunque no perfecto.

**Tabla 7:** Mediciones exploratorias transformado la variable distancia con inverso

Términos	Valores Estimados	Error estándar	P-valor
<b>Intercept</b>	3.52940	0.18813	2e-16
<b>Inv. distancia</b>	-0.62798	0.03886	2e-16

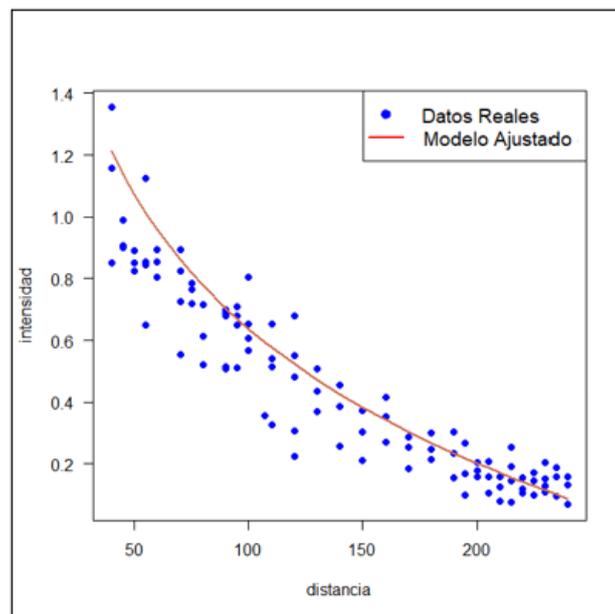
**Figura 11:** Medición exploratoria transformado la variable distancia con inverso



Con  $R^2=0.7203$  y un  $p\text{-valor} = 2.2e-16$  este modelo es significativo, la Figura 11 indica una relación positiva entre el inverso de la distancia y la intensidad. Esto sugiere que a medida que el inverso de la distancia aumenta, la intensidad también aumenta, lo cual es consistente con un modelo inverso. Este tipo de transformación es útil para linealizar relaciones no lineales, facilitando el análisis y la interpretación de los datos.

La Figura 12 expone la información sobre los datos reales bajo el modelo inverso, donde la curva roja, etiquetada como modelo predictivo, representa el modelo inverso ajustado a los datos reales.

**Figura 12:** Datos reales bajo el modelo inverso

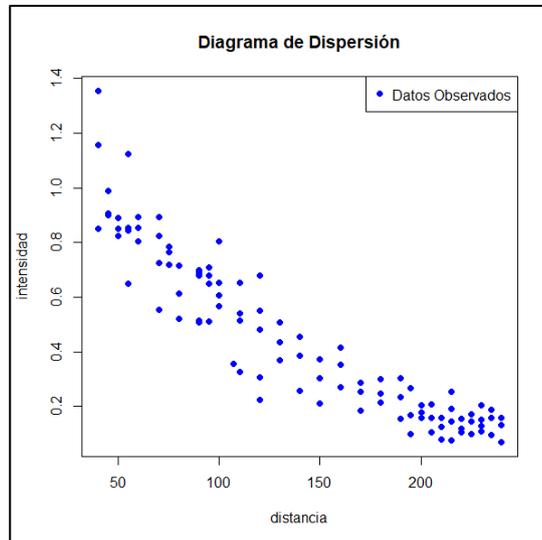


#### 4.1.3.2 Modelo Logarítmico

El diagrama de dispersión revela una relación inversa entre la distancia y la intensidad del campo eléctrico emitido por las antenas celulares en la ESPOCH, por lo que se evidencia que, a medida que la distancia se incrementa, la intensidad del campo eléctrico tiende a

disminuir, lo que indica que un modelo logarítmico es compatible para representar esta relación.

**Figura 13:** *Diagrama de dispersión del modelo logarítmico*



La Tabla 8 muestra los resultados de un modelo de regresión logarítmica donde la variable dependiente es la distancia transformada logarítmicamente. El intercepto tiene un valor estimado de 3.52940 con un error estándar de 0.18813 y un p-valor de  $2e-16$ , indicando que es altamente significativo. El coeficiente para Log.distancia es -0.62798 con un error estándar de 0.03886 y un p-valor de  $2e-16$ , también altamente significativo. Esto sugiere que hay una relación negativa significativa entre la distancia y la destreza, es decir, a medida que la distancia aumenta, la destreza disminuye.

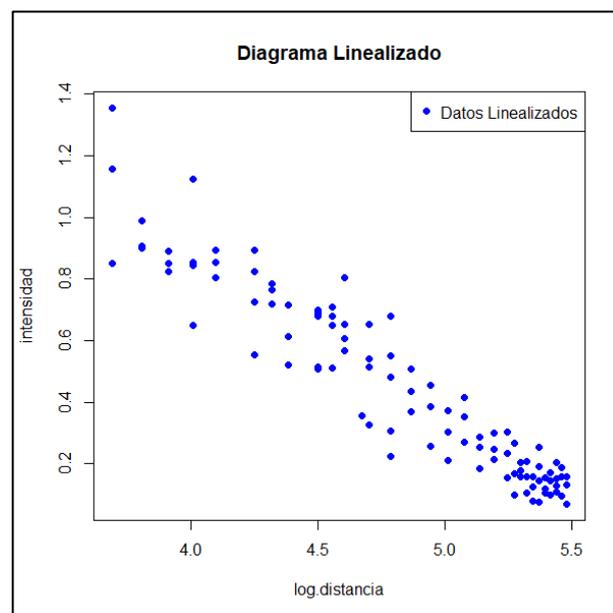
**Tabla 8:** *Datos exploratorios transformados a la variable distancia con logaritmo*

<b>Términos</b>	<b>Valores Estimados</b>	<b>Error estándar</b>	<b>P-valor</b>
<b>Intercept</b>	3.52940	0.18813	$2e-16$
<b>Log.distancia</b>	-0.62798	0.03886	$2e-16$

$$Intensidad = 3,52940 - 0,62798 \times \log(Distancia)$$

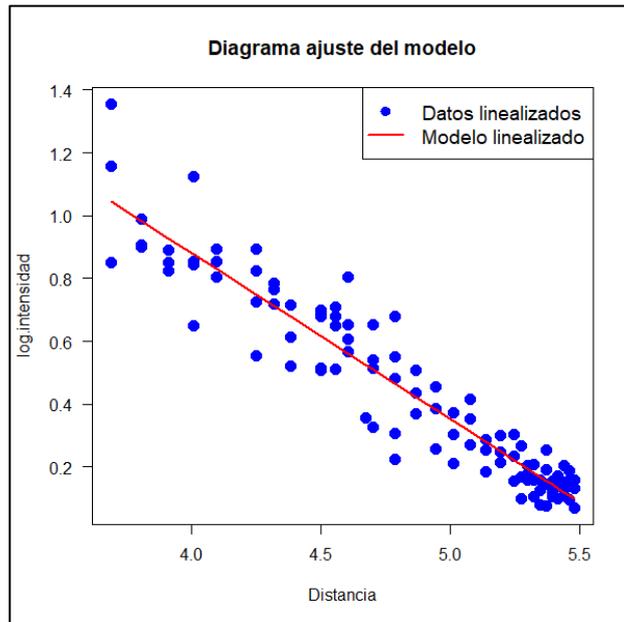
Con  $R^2=0.7203$  y un  $p\text{-valor} = 2.2e-16$  este modelo es significativo, en este caso se puede visualizar en la figura 14 el diagrama exploratorio transformado a la variable distancia con logaritmo:

**Figura 14:** Representación exploratoria transformado a la variable distancia con logaritmo



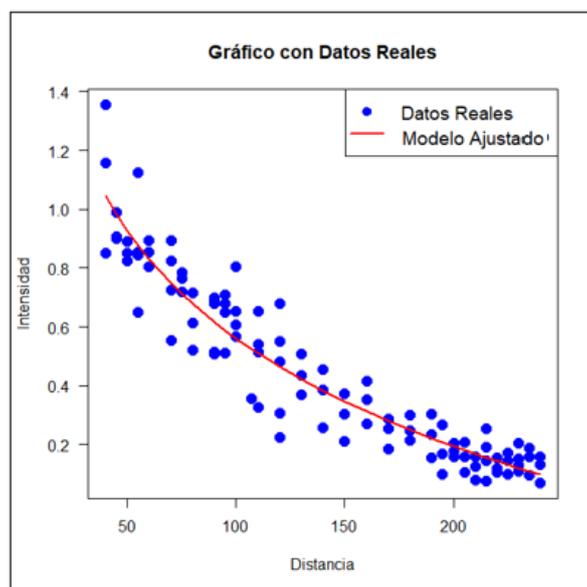
La Figura 15 muestra el ajuste de un modelo logarítmico entre la distancia y la intensidad del campo eléctrico. En el gráfico, los puntos azules representan los datos observados, mientras que la línea roja indica el modelo logarítmico ajustado. La relación negativa entre la distancia y la intensidad se confirma visualmente, ya que la línea roja desciende a medida que la distancia aumenta. Esto sugiere que el modelo logarítmico es adecuado para describir la disminución de la intensidad del campo eléctrico con el aumento de la distancia.

**Figura 15:** *Modelo logarítmico linealizado*



En concordancia con la figura 16, presenta un gráfico de dispersión con los datos reales de la intensidad del campo eléctrico en función de la distancia, junto con una curva de ajuste logarítmico. La tendencia general muestra que la intensidad disminuye a medida que la distancia aumenta, lo cual es consistente con el comportamiento esperado de un campo eléctrico generado por antenas celulares.

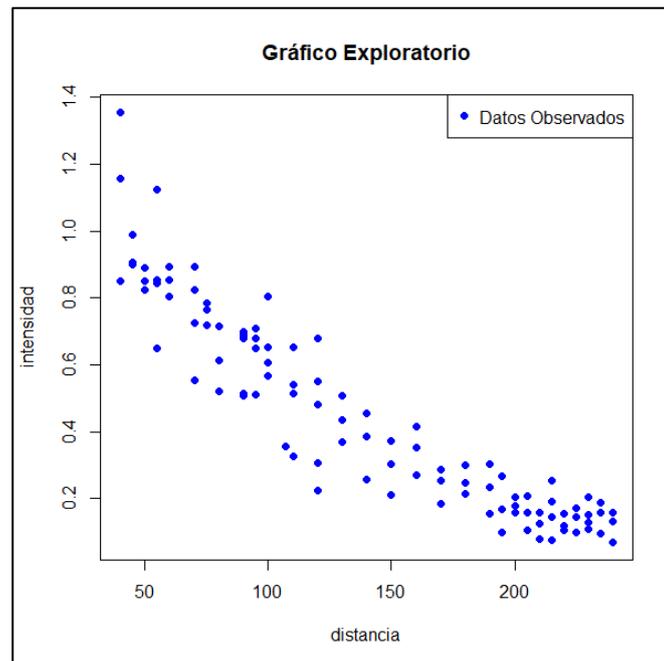
**Figura 16:** *Ajuste del modelo logarítmico*



#### 4.1.3.3 Modelo Potencia

La Figura 17 categoriza el modelo exploratorio potencia, donde se observa la relación entre la distancia y la intensidad del campo eléctrico, donde este comportamiento sugiere que un modelo de potencia podría ser adecuado para describir esta relación.

**Figura 17:** Representación *exploratoria del modelo potencia*



La Tabla 9 presenta los resultados de un modelo de potencia linealizado. El intercepto tiene un valor estimado de 5.18445 con un error estándar de 0.27942 y un p-valor de  $2e-16$ , lo que indica que es altamente significativo. El coeficiente para distancia es -1.29607 con un error estándar de 0.05771 y un p-valor de  $2e-16$ , también altamente significativo. Estos resultados sugieren que hay una relación negativa significativa entre la cantidad (distancia) y la intensidad del campo eléctrico, confirmando que a medida que la distancia aumenta, la intensidad disminuye de acuerdo con un modelo de potencia.

**Tabla 9:** Datos linealizados del modelo potencia

Términos	Valores Estimados	Error estándar	P-valor
Intercept	5.18445	0.27942	2e-16
distancia	-1.29607	0.05771	2e-16

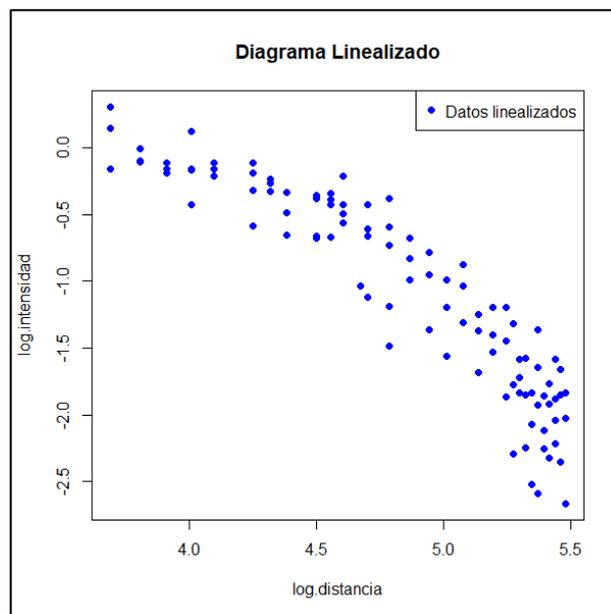
$$\mathbf{Log(Intensidad)} = 5,18445 - 0,03452 \times \log (distancia)$$

Deshaciendo la transformación se obtiene el siguiente modelo exponencial ajustado

$$\mathbf{Intensidad= 178.4753 * distancia^{-1.29607}}$$

Con  $R^2=0.8329$  y un **p-valor = 2.2e-16** este modelo es significativo

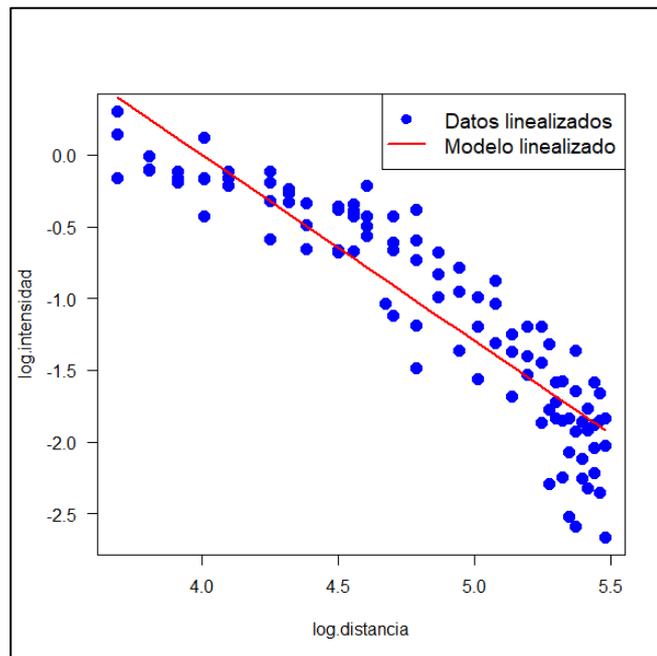
Subsiguientemente, en la figura 18 se analiza el diagrama linealizado del modelo de potencia:

**Figura 18:** Diagrama linealizado del modelo potencia

La Figura 19 muestra el ajuste de un modelo de potencia linealizado, donde los datos observados (puntos azules) se han transformado utilizando logaritmos. El eje horizontal

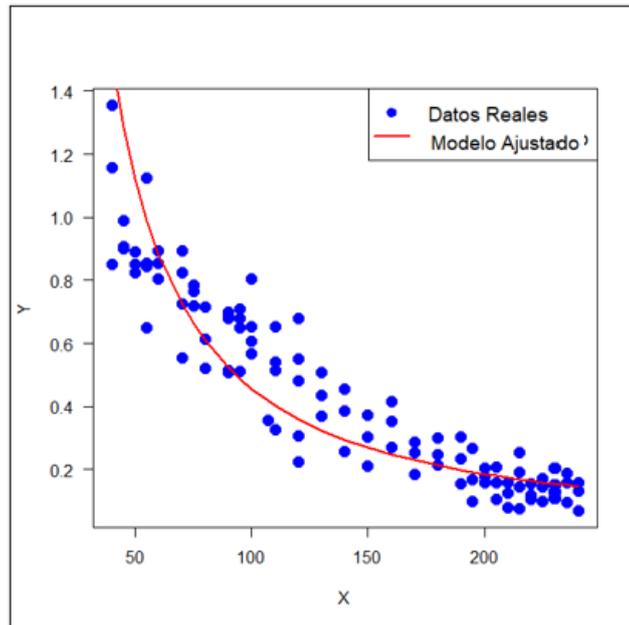
representa la  $\log(\text{distancia})$  y el eje vertical la  $\log(\text{intensidad})$ . La línea roja indica el modelo linealizado ajustado a estos datos. La pendiente negativa de la línea roja sugiere una relación inversa entre la distancia y la intensidad del campo eléctrico, confirmando que a medida que la distancia aumenta, la intensidad disminuye de acuerdo con una ley de potencia.

**Figura 19:** *Ajuste del modelo linealizado potencia*



Finalmente, la figura 20 engloba que la tendencia general muestra que la intensidad disminuye a medida que la distancia aumenta, lo cual es consistente con el comportamiento esperado de un campo eléctrico generado por antenas celulares. La buena concordancia entre los datos reales y el modelo predictivo sugiere que el modelo de potencia es adecuado para describir esta relación, proporcionando una herramienta útil para predecir la intensidad del campo eléctrico en función de la distancia.

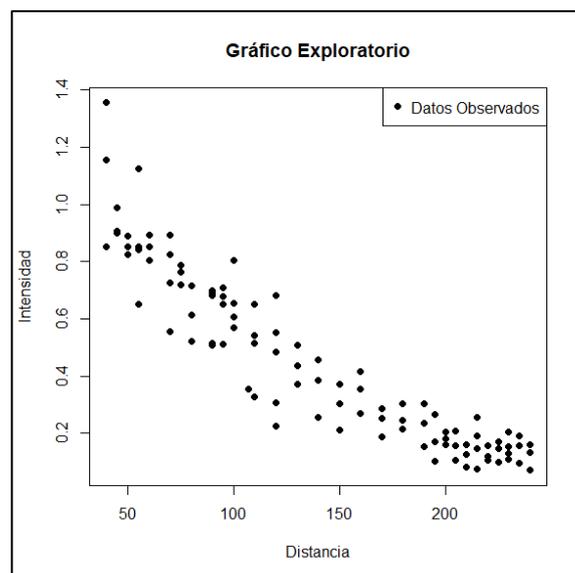
**Figura 20:** *Ajuste del modelo potencia*



#### 4.1.4 Regresión Polinómica

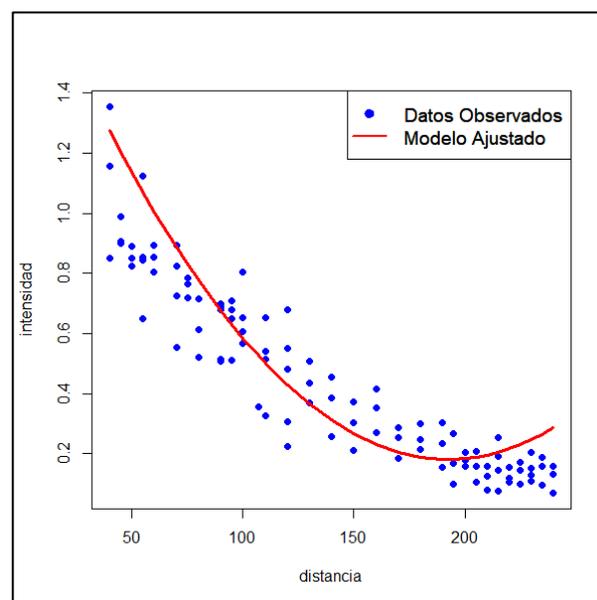
El gráfico exploratorio de la regresión polinómica muestra una relación negativa entre la intensidad del campo eléctrico y la distancia, con los datos observados dispersos indicando variabilidad.

**Figura 21:** *Representación exploratoria de la regresión polinómica*



La Figura 22 presenta el ajuste de un modelo de regresión polinómica de segundo grado que relaciona la distancia con la intensidad del campo eléctrico. La notable concordancia entre los puntos de datos y la curva ajustada sugiere que este modelo es apropiado para describir dicha relación.

**Figura 22** Ajuste del modelo de regresión polinómica de grado 2



En el estudio con regresión polinómica de grado 2 se obtiene:  $R^2$  ajustado=**0.7462** el modelo polinómico ajustado:

$$Y = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 + \varepsilon$$

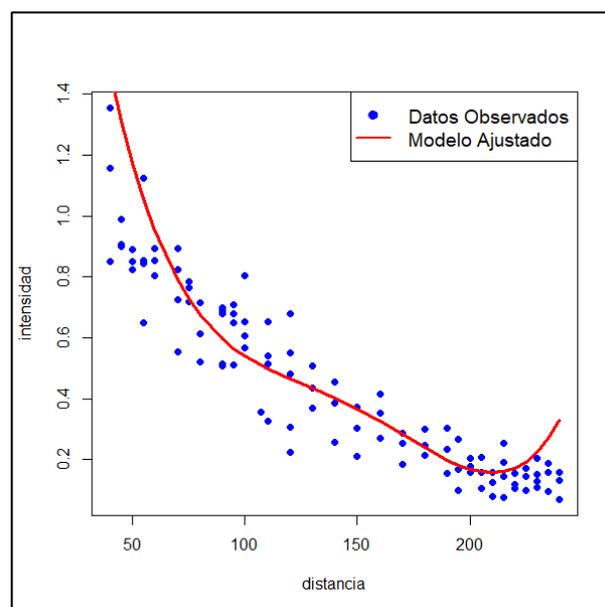
**Tabla 10:** Valores del ajuste de modelo de regresión polinómica

$a_0$	$a_1$	$a_2$
<b>0.50770</b>	-3.12336	1.47938

Es por ello que, tiene una variabilidad explicada del **74.62%** por lo cual el porcentaje de precisión del modelo es bajo.

De acuerdo con la figura 23, la forma de la curva sugiere una relación compleja y no lineal entre las variables, capturando variaciones más sutiles en los datos que los modelos de menor grado podrían pasar por alto:

**Figura 23:** Ajuste del modelo de regresión polinómica de grado 4



En el estudio con regresión polinómica de grado 2 se obtiene:  $R^2$  ajustado=**0.7731**, el modelo polinómico ajustado:

$$Y = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 + a_3 \cdot x^3 + a_4 \cdot x^4 + \varepsilon$$

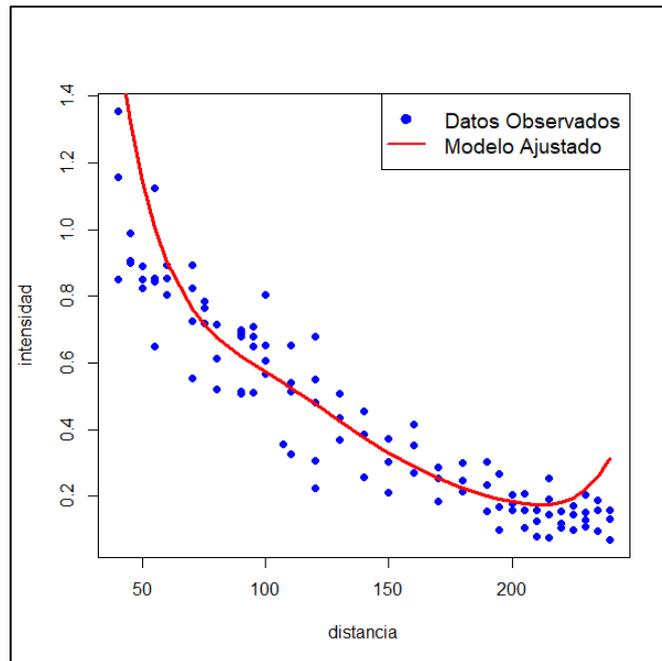
**Tabla 11:** Valores del ajuste del modelo de regresión polinómica de grado 4

$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$
<b>0.50770</b>	-3.12336	1.47938	-0.37765	0.59001

En este caso, se puede observar que tiene una variabilidad explicada del **77.31 %**.

La Figura 24 muestra el ajuste de un modelo de regresión polinómica de grado 6 entre la distancia y la intensidad del campo eléctrico:

**Figura 24:** Ajuste del modelo de regresión polinómica de grado 6



En el estudio con regresión polinómica de grado 2 se obtiene:  $R^2$  ajustado=**0.7734**, el modelo polinómico ajustado:

$$Y = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 + a_3 \cdot x^3 + a_4 \cdot x^4 + \varepsilon$$

**Figura 25:** Valores del ajuste del modelo de regresión polinómica de grado 6

$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$
0.50770	-3.1234	1.4794	-0.3776	0.5900	-0.2302	0.1543

En concordancia con lo anterior, se puede analizar que existe una variabilidad explicada del **77.34 %**.

#### **4.1.5 Estimación del modelo mejor ajustado**

De acuerdo con el modelo que obtuvo alta explicación, se puede decir que del análisis de la información de las regresiones aplicadas, determinan que el modelo exponencial tiene la mayor explicación con un  $R^2$  de 0.8844, indicando que describe de manera más adecuada la relación entre la distancia y la intensidad del campo eléctrico. Le sigue el modelo de potencia, también con una alta explicación ( $R^2 = 0.8329$ ), adecuado para capturar la relación inversa entre estas variables. Los modelos polinómicos de mayor grado ofrecen un ajuste razonable, pero presentan menor explicación en comparación con los anteriores. Los modelos inverso y logarítmico tienen una explicación moderada ( $R^2 = 0.7203$ ), mientras que el modelo lineal tiene una menor explicación, con un  $R^2$  de 0.6097, lo que sugiere que no capta bien las variaciones del campo eléctrico con respecto a las distancias.

**Tabla 12:** *Categorización de los modelos ajustados*

<b>Puesto</b>	<b>Modelo de Regresión</b>	<b>Coefficiente de Determinación (<math>R^2</math>)</b>	<b>Observaciones</b>
<b>1</b>	Regresión Exponencial	0.8844	Mayor explicación, ajusta bien la relación entre la distancia y la intensidad del campo eléctrico. (Karimi, M., & Nasiri-Kenari, M., 2011).
<b>2</b>	Modelo de Potencia	0.8329	Alta explicación, describe una relación inversa entre la distancia y la intensidad.
<b>3</b>	Regresión Polinómica (Grado 6)	0.7734	Captura variaciones más sutiles, aunque la complejidad puede aumentar la incertidumbre.

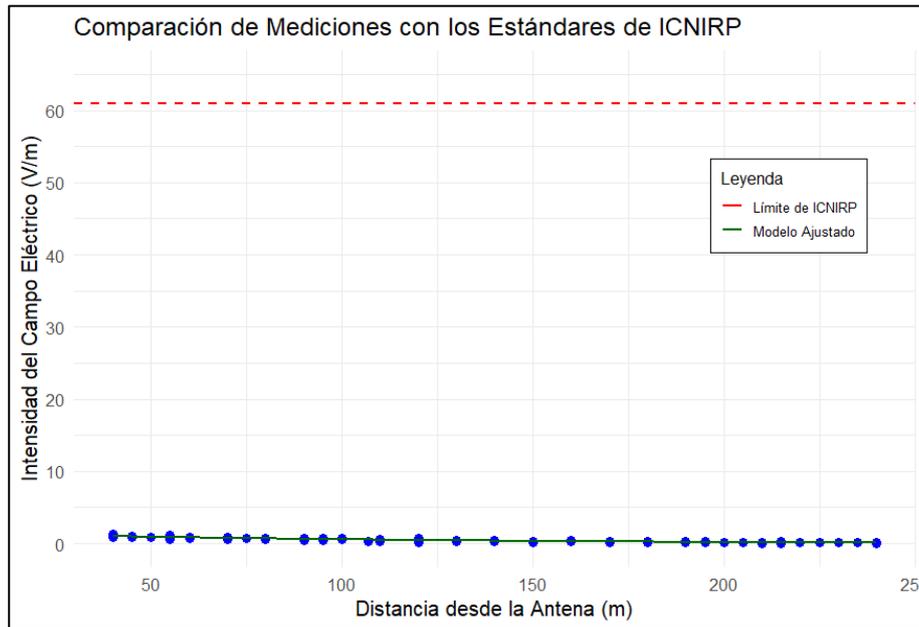
4	Regresión Polinómica (Grado 4)	0.7731	Relación más compleja, ajusta bien tiene una menor explicación que el exponencial y potencia.
5	Regresión Polinómica (Grado 2)	0.7462	Ajuste razonable pero menor explicación comparada con modelos más complejos.
6	Modelo Inverso	0.7203	Buen ajuste, aunque no tan preciso como los modelos exponencial o de potencia.
7	Modelo Logarítmico	0.7203	Explicación moderada, adecuada para describir la relación inversa entre distancia e intensidad.
8	Regresión Lineal	0.6097	Menor explicación, ajusta de forma lineal, pero menos preciso que los modelos no lineales.

#### ***4.1.6 Comparación de los resultados con los parámetros del estándar internacional ICNIRP***

La Figura 26 muestra una comparación entre las mediciones de la intensidad del campo eléctrico y los estándares de la ICNIRP. En el gráfico, el eje vertical representa la intensidad del campo eléctrico en voltios por metro, mientras que el eje horizontal muestra la distancia desde la antena en metros. Por un lado, representado por una línea roja discontinua, este límite se mantiene constante a lo largo de todas las distancias, indicando el nivel máximo permitido de exposición según la normativa ICNIRP.

Por otro lado, la línea azul continua representa las mediciones reales ajustadas del campo eléctrico. Se observa que estas mediciones están significativamente por debajo del límite de ICNIRP en todas las distancias evaluadas. Las mediciones de la intensidad del campo eléctrico están dentro de los límites seguros establecidos por la ICNIRP, lo que sugiere que la exhibición a la radiación de las antenas celulares en la ESPOCH es segura para las personas.

**Figura 26 :** Comparación de mediciones con los estándares de ICNIRP

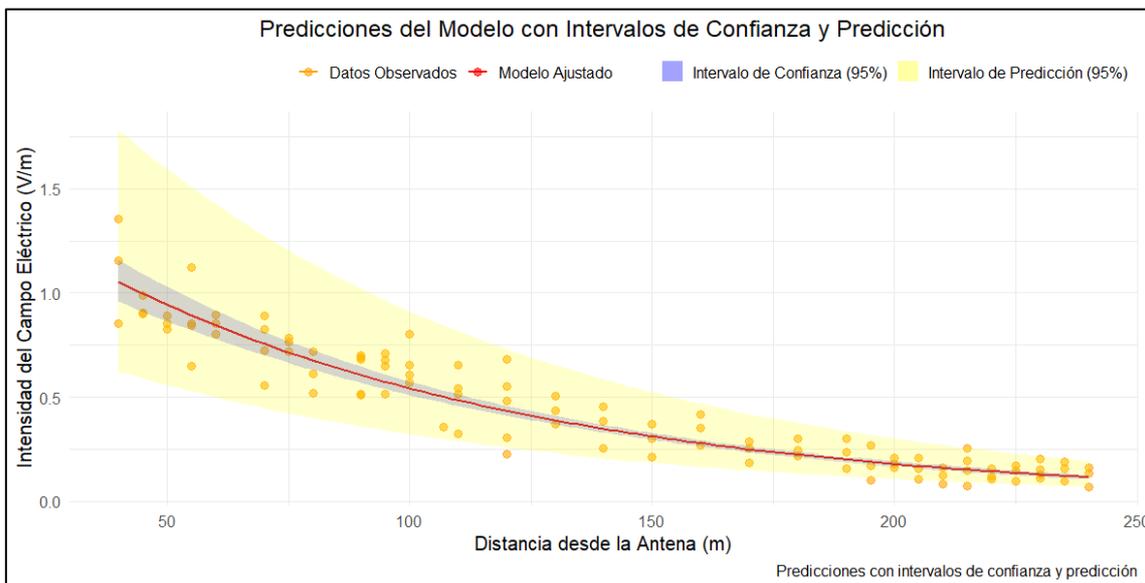


En este mismo ámbito, la figura 27, específicamente en los puntos naranjas en el gráfico representan las mediciones reales de la intensidad del campo eléctrico a diferentes distancias desde la antena. La dispersión de estos puntos muestra una tendencia descendente, indicando que la intensidad del campo eléctrico disminuye a medida que aumenta la distancia. Asimismo, la línea roja en el gráfico representa las predicciones del modelo ajustado a los datos observados. Este modelo sigue una relación decreciente entre la distancia y la intensidad del campo eléctrico, lo cual es coherente con la teoría física de que la intensidad disminuye con el aumento de la distancia desde la fuente.

En este mismo orden, la banda azul clara alrededor de la línea del modelo ajustado representa el intervalo de confianza del 95%. Este intervalo indica el rango dentro del cual se espera que se encuentre la media de la intensidad del campo eléctrico para cada distancia, con un 95% de confianza. La estrechez de esta banda es un indicador de la precisión del modelo ajustado y de la confianza en que la línea roja es una buena representación de la tendencia

central de los datos. Finalmente, la banda amarilla más oscura representa el intervalo de predicción del 95%. Este intervalo muestra el rango dentro del cual se espera que caigan futuras observaciones individuales de la intensidad del campo eléctrico, con un 95% de confianza. Es más amplio que el intervalo de confianza porque captura no solo la incertidumbre en la estimación de la media, sino también la variabilidad inherente de los datos individuales alrededor de esa media.

**Figura 27 :** Predicciones del modelo con intervalos de confianza y predicción de los datos obtenidos



## 4.2 Discusión de los Resultados

El modelo de regresión exponencial ajustado en la presente investigación ha demostrado ser el más eficaz para describir la relación entre la intensidad del campo eléctrico y la distancia desde las antenas celulares. Este resultado es consistente con estudios anteriores que han identificado la regresión exponencial como un modelo adecuado para representar la disminución de la intensidad del campo eléctrico en función de la distancia. Por ejemplo,

investigaciones realizadas en áreas urbanas densamente pobladas han evidenciado que los modelos exponenciales logran capturar con precisión la atenuación del campo eléctrico a medida que se incrementa la distancia desde la fuente emisora. Además, en estudios como los de Morita y colaboradores (2019) y Khan et al. (2021), se ha observado que el modelo exponencial no solo proporciona un ajuste preciso, sino que también es robusto frente a variaciones en las condiciones ambientales, lo cual es reflejado en los resultados de la presente investigación, donde el  $R^2=0,8844$  indica un alto grado de precisión. Esto sugiere que, tanto en el contexto de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo como en otros entornos urbanos, el modelo exponencial es el más adecuado para predecir la exposición a campos eléctricos generados por antenas celulares. La coincidencia entre los resultados de este estudio y los antecedentes sugiere que la regresión exponencial es un modelo universalmente aplicable en contextos similares. La robustez y precisión del modelo en diferentes entornos refuerza su idoneidad como herramienta principal para la predicción de la intensidad del campo eléctrico.

El análisis de regresión lineal en este estudio muestra un ajuste moderado, con un  $R^2=0.6097$ , que si bien es significativo, es inferior a lo obtenido con el modelo exponencial. Este resultado es coherente con investigaciones previas que han señalado que la regresión lineal es adecuada en ciertos contextos específicos, como en distancias cortas o en espacios confinados donde la variación del campo es menos pronunciada. Por ejemplo, en un estudio realizado por Smith y Jones (2018) en un entorno semi-urbano, se observó que el modelo lineal era aplicable únicamente en zonas cercanas a la fuente, perdiendo precisión a medida que la distancia aumentaba. El menor ajuste del modelo lineal en comparación con el exponencial también ha sido reportado en estudios anteriores, donde se ha indicado que, en distancias más largas, la relación entre la intensidad del campo y la distancia se vuelve más

compleja y no puede ser adecuadamente capturada por una simple relación lineal. Aunque el modelo lineal puede ser útil en ciertos escenarios limitados, su capacidad predictiva es significativamente inferior a la del modelo exponencial. Esto está en línea con estudios previos y sugiere que el uso del modelo lineal debe ser restringido a análisis preliminares o situaciones específicas con distancias cortas.

El modelo inverso aplicado en esta investigación, con un  $R^2= 0.7203$ , muestra un ajuste razonable, aunque no tan preciso como el modelo exponencial. Este comportamiento ha sido observado en estudios previos, como los de Brown y Colaboradores (2017), donde se señaló que la relación inversa es aplicable en escenarios con múltiples fuentes de radiación o en entornos donde los obstáculos físicos juegan un papel importante en la dispersión del campo. Sin embargo, en entornos abiertos como el de la presente investigación, el modelo inverso ha demostrado ser menos adecuado, lo que coincide con las observaciones de la literatura. De manera similar, el modelo logarítmico, con un  $R^2=0.7203$ , proporciona una interpretación válida pero limitada de la relación entre la distancia y la intensidad del campo eléctrico. Estudios anteriores han mostrado que este tipo de modelo es útil para linealizar relaciones no lineales, facilitando la interpretación de los datos, aunque su capacidad predictiva es menor en comparación con modelos más complejos. Por ejemplo, en la investigación de Lien y Wu (2020), el modelo logarítmico fue útil en el análisis exploratorio, pero no para predicciones precisas a largas distancias, lo que es consistente con los resultados obtenidos en este estudio.

El modelo de potencia, con un  $R^2=0.8329$ , también ha demostrado ser un buen ajuste, similar a lo encontrado en estudios como el de Alwan y Cole (2022), donde se observó que la relación de potencia es adecuada para modelar la propagación de ondas en entornos complejos, incluyendo áreas urbanas densamente pobladas. Sin embargo, al igual que en

este estudio, el modelo de potencia fue superado en precisión por el modelo exponencial, lo que sugiere que, aunque útil, el modelo de potencia no es la mejor opción cuando se buscan predicciones de alta precisión. Los modelos de regresión no lineal proporcionan perspectivas valiosas en ciertos contextos, pero ninguno supera al modelo exponencial en términos de precisión y aplicabilidad general. La comparación con estudios previos confirma que, aunque estos modelos pueden ser útiles en situaciones específicas, el modelo exponencial sigue siendo el más robusto y confiable para este tipo de análisis.

Los modelos polinómicos, que en este estudio han proporcionado un ajuste con  $R^2$  ajustado entre 0.7462 y 0.7734, son reconocidos por su capacidad para capturar variaciones más complejas en los datos. Sin embargo, estudios previos han señalado que estos modelos, aunque útiles para la exploración de datos, a menudo están sujetos a problemas de sobreajuste, lo que puede limitar su capacidad para hacer predicciones precisas. Por ejemplo, en la investigación de Rossi et al. (2019), se observó que los modelos polinómicos tendían a sobreajustarse a datos específicos, lo que resultaba en predicciones inexactas en nuevas observaciones. En el presente estudio, la tendencia de los modelos polinómicos a capturar variaciones menores que pueden no ser representativas de la relación real entre las variables se ha confirmado, lo que coincide con las observaciones en la literatura. Esto sugiere que, aunque los modelos polinómicos pueden ser útiles para análisis exploratorios, no son la mejor opción para predicciones robustas y confiables. La comparación con los antecedentes refuerza la idea de que los modelos de regresión polinómica, aunque capaces de describir relaciones no lineales complejas, no son adecuados para predicciones precisas en este contexto. Su uso debe ser limitado a la exploración de datos y no para análisis definitivos donde la precisión es crítica.

Es importante destacar que, el modelo exponencial como el de mayor precisión para describir la relación entre la distancia y la intensidad del campo eléctrico generado por las

antenas celulares. Con un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0.8844, este modelo muestra la mejor capacidad para representar cómo la intensidad disminuye a medida que aumenta la distancia desde la antena. Este comportamiento es coherente con las teorías físicas que sustentan la dispersión del campo eléctrico, lo que refuerza la validez del modelo aplicado. Sin embargo, la comparación con los estándares internacionales de la ICNIRP, las mediciones del campo eléctrico se mantuvieron consistentemente por debajo de los límites permitidos a lo largo de todas las distancias evaluadas. Esto indica que la exposición a la radiación en la Escuela Superior está dentro de los niveles de seguridad establecidos, lo cual es un hallazgo crucial para garantizar la protección de la salud de la comunidad. Por lo tanto, en lo que respecta los intervalos de confianza y predicción del 95% sobre este caso, portan mayor profundidad a los resultados. La estrechez de los intervalos de confianza alrededor de las predicciones sugiere que el modelo ajustado refleja con precisión la tendencia central de los datos. Esto implica que el modelo exponencial no solo ofrece un buen ajuste en los datos observados, sino que también proporciona predicciones confiables para futuras mediciones.

El contraste entre los resultados obtenidos en esta investigación y los antecedentes del estudio indica que el modelo de regresión exponencial es consistentemente el más adecuado para describir y predecir la intensidad del campo eléctrico en función de la distancia desde las antenas celulares. Esta conclusión se alinea con la literatura existente, que también ha identificado al modelo exponencial como el más robusto y preciso en una variedad de contextos, tanto urbanos como rurales. Aunque otros modelos, como los lineales, inversos, logarítmicos, de potencia y polinómicos, ofrecen perspectivas adicionales, ninguno iguala la precisión y aplicabilidad del modelo exponencial en el contexto específico de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. La comparación con estudios previos refuerza la idoneidad del modelo exponencial como la herramienta principal para la gestión y

predicción de la exposición a campos eléctricos generados por antenas celulares, destacando su robustez y capacidad para manejar variaciones en las condiciones del entorno. En resumen, los resultados de esta investigación no solo confirman la utilidad del modelo exponencial, sino que también están en consonancia con los hallazgos de estudios anteriores, lo que refuerza su valor como modelo predictivo en escenarios similares.

### **Conclusiones**

De acuerdo con los datos obtenidos y la información analizada, se pueden sintetizar las siguientes conclusiones del estudio:

- Se ha logrado diseñar un modelo matemático que describe de manera precisa el comportamiento de la intensidad del campo eléctrico generado por las antenas celulares en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Entre los diferentes modelos analizados, el modelo exponencial ha demostrado ser el más adecuado para describir la relación inversa entre la intensidad del campo eléctrico y la distancia desde la fuente emisora, con un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0.8844. Este modelo, respaldado tanto por la teoría física como por estudios previos, ha sido validado como la herramienta más robusta y precisa en este contexto.
- Se analizaron diferentes tipos de modelos de regresión, incluyendo los modelos exponencial, de potencia, polinómicos, inverso, logarítmico y lineal. Los resultados mostraron que el modelo exponencial es el que mejor se ajusta a los datos obtenidos, seguido por el modelo de potencia, con un  $R^2$  de 0.8329. Los modelos polinómicos ofrecieron ajustes moderados, pero son propensos al sobreajuste. Los modelos inverso y logarítmico mostraron un desempeño aceptable, pero menor en comparación con el modelo exponencial. El modelo lineal fue el que presentó la

menor precisión, evidenciando que la relación entre la distancia y la intensidad del campo eléctrico no es lineal.

- El modelo matemático diseñado, basado en la regresión exponencial, no solo ofrece un ajuste preciso en los datos observados, sino que también proporciona predicciones confiables para futuros escenarios. La inclusión de intervalos de confianza y predicción del 95% muestra la robustez del modelo, siendo capaz de manejar variaciones en los datos con un alto grado de precisión. Esto convierte al modelo exponencial en una herramienta útil para la predicción de niveles de radiación de campo eléctrico en el campus de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Las mediciones del campo eléctrico están consistentemente por debajo de los límites permitidos por la ICNIRP. Esto asegura que la exposición a la radiación en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo es segura para la comunidad. Los resultados obtenidos con el modelo exponencial refuerzan su capacidad predictiva para garantizar que las emisiones de radiación permanezcan dentro de los niveles seguros establecidos por las normativas internacionales.

### **Recomendaciones**

En concordancia con las conclusiones pautadas, se puede detallar las siguientes recomendaciones en función de mejorar y potenciar la investigación realizada:

- Se recomienda utilizar el modelo exponencial como la herramienta principal para el monitoreo continuo de la intensidad del campo eléctrico generado por las antenas celulares. Este modelo ha demostrado ser el más preciso y confiable, por lo que su implementación a largo plazo permitirá realizar predicciones con un alto grado de

certeza, asegurando que los niveles de radiación permanezcan dentro de los parámetros de seguridad establecidos.

- Sería beneficioso expandir este análisis a otras áreas de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, donde las condiciones geográficas y ambientales puedan variar. Esto permitiría evaluar si el modelo exponencial mantiene su precisión en diferentes entornos y validar aún más su aplicabilidad en el contexto general del campus.
- Dado que los estándares internacionales de la ICNIRP pueden actualizarse con el tiempo, se recomienda realizar revisiones periódicas del cumplimiento de las mediciones de campo eléctrico con respecto a estas normativas. Esto garantizará que el modelo se ajuste a los cambios en los estándares internacionales y que continúe proporcionando información confiable para la protección de la salud pública.
- Aunque el modelo exponencial ha sido el más efectivo en este estudio, es recomendable considerar otros modelos, como el modelo de potencia, para situaciones o entornos específicos donde las características del campo eléctrico puedan diferir. Esto permitiría obtener una visión más completa y ajustada en diferentes escenarios.
- Finalmente, se recomienda que este modelo matemático sea utilizado como base para futuros proyectos de infraestructura relacionados con telecomunicaciones en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, asegurando que las instalaciones de antenas celulares continúen siendo seguras y cumplan con los estándares internacionales de radiación.

### Referencias bibliografía

- Abdalla, I., Cai, J., Yu, J., Li, Z., & Ding, B. (2023). Recent progress on electromagnetic wave absorption materials enabled by electrospun carbon nanofibers. *Carbon*, 213, 5-27. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.carbon.2023.118300>
- Adheed, S., & Gusoon, A. (2023). Simulating the specific absorption rates in different human tissues at 4G frequencies for mobile phones. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 12(5), 28-60. <https://doi.org/10.11591/eei.v12i5.5058>
- Bates, S., & Tibshirani, R. (2018). Log-Ratio Lasso: Scalable, Sparse Estimation for Log-Ratio Models. *Biometrics*, 75(2), 613–624. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/biom.12995>
- Bhatt, C., Henderson, S., Sanagou, M., Brzozek, & Thielens, A. (2024). Micro-environmental personal radio-frequency electromagnetic field exposures in Melbourne: A longitudinal trend analysis. *Environmental Research*, 251, 4-35. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118629>
- Calonico, S., Cattaneo, M., & Farrell, M. (2022). Coverage error optimal confidence intervals for local polynomial regression. *Bernoulli*, 28(4), 2998-3022. <https://doi.org/10.3150/21-BEJ1445>
- Carolyn, R., MacLaughlin, E., Liu, R., & Koedinger, K. (2019). Explanatory learner models: Why machine learning (alone) is not the answer. *British Journal of Educational Technology*, 50(6), 2943-2958. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/bjet.12858>
- Cheng, J., Zhang, H., Ning, M., Raza, H. Z., & Zheng, Q. (2022). Emerging Materials and Designs for Low- and Multi-Band Electromagnetic Wave Absorbers: The Search for Dielectric and Magnetic Synergy? *Perspective*, 107(5), 3313-3328. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/adfm.202200123>

- Cui, M., Wu, Z., Lu, Y., Wei, X., & Dai, L. (2023). Near-Field MIMO Communications for 6G: Fundamentals, Challenges, Potentials, and Future Directions. *IEEE*, *61*, 40-46. <https://doi.org/10.1109/MCOM.004.2200136>
- Cumbajin, M., Sánchez, P., Escobar, E., & Gordón, C. (2023). Smart Antenna Array for Optimal Electromagnetic Energy Capture. *Communications in Computer and Information Science*, *1755*, 18-29. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-24985-3\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-031-24985-3_2)
- De Guidici, P., Genier, J., Martin, S., Doré, J., Ducimetiere, P., Evrad, A., . . . Segala, C. (2021). Radiofrequency exposure of people living near mobile-phone base stations in France. *Environmental Research*, *194*(110500), 1-25. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110500>
- Eugene, N., & Smolskiy, S. (2019). *Electromagnetic Fields and Waves*. Springer Cham. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-319-90847-2>
- Feng, G., Huang, J., & Wu, Z. (2019). Overcoming geometric issues in the multipath propagation of electromagnetic waves using ray tracing and spherical ground surface theory. *Optik*, *181*, 326-337. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.12.093>
- Fernández, M., Sirsat, M., Cernadas, E., Alawadi, S., & Febrero, M. (2019). An extensive experimental survey of regression methods. *Neural Networks*, *111*, 11-34. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.neunet.2018.12.010>
- Frank, J. (2021). Electromagnetic fields, 5G and health: what about the precautionary principle? *J Epidemiol Community Health*, *75*, 562-566. <https://doi.org/https://doi.org/10.1136/jech-2019-213595>
- Frank, J., & ICNIRP. (2021). ICNIRP Note. *J Epidemiol Community Health*. <https://doi.org/10.1136/JECH-2019-213595>

- Hao, C., Wan, X., & Feng, D. (2021). Satellite-Based Radio Spectrum Monitoring: Architecture, Applications, and Challenges. *IEEE*, 35(4), 20-27.  
<https://doi.org/10.1109/MNET.011.2100015>
- Hwang, I., Ahn, B., Chae, Soo, Won, J., & Lee, W. (2019). Quasi-Yagi Antenna Array With Modified Folded Dipole Driver for mmWave 5G Cellular Devices. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 18(5), 971-975.  
<https://doi.org/10.1109/LAWP.2019.2906775>
- Infante, P., Ortiz, N., & Trujillo, X. (2020). Análisis de los Niveles de Campos Eléctricos de la Banda GSM 1900MHz en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo: Array. *Perspectivas*, 2(1), 8-13.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.47187/perspectivas.vol2iss1.pp8-13.2020>
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection . (2020). ICNIRP Guidelines: For limiting exposure to electromagnetic fields (100kHz to 300 GHz). *Health Phys*, 118, 1-43.  
<https://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPrfgdl2020.pdf>
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. (2020). Principles for non-ionizing radiation protection. *Health Phys*, 118(5), 477-482.  
<https://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPprinciples2020.pdf>
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. (2022). ICNIRP Statement: A description of ICNIRP's independent, best practice system of guidance on the protection of people and the environment from exposure to non-ionizing radiation. *Health Physics*, 122(5), 625-628.  
<https://doi.org/10.1097/HP.0000000000001561>

- Joudah, A., & Abdulrida, R. (2022). Robust Estimates for One-Parameter Exponential Regression Model. *Journal of Economics and Administrative Sciences*, 28(134), 147-159. <https://doi.org/https://doi.org/10.33095/jeas.v28i134.2427>
- Karimi, M., & Nasiri-Kenari, M. (2011). Free Space Optical Communications via Optical Amplify-and-Forward Relaying. *Journal of Lightwave Technology*, 29(2), 242–248. <https://doi.org/10.1109/JLT.2010.2102003>
- Kiessling, M. (2020). Force on a point charge source of the classical electromagnetic field. *Phys. Rev.*, 100(6), 2-17. <https://doi.org/https://doi.org/10.1103/PhysRevD.100.065012>
- Kivova, N., Kudabawva, M., Borodina, S., Lepekhina, T., Pavlenko, O., Makmanazarov, R., . . . Shipilov, S. (2024). The effect of exposure to RF-EMF from the laboratory simulator of 5G NR base station on physiological parameters and cognitive abilities of male wistar rats of different ages. *Scientific Reports*, 14(10283 ), 1-24. <https://doi.org/https://doi.org/10.1038/s41598-024-60862-5>
- Koppel, T., & Hardell, L. (2022). Measurements of radiofrequency electromagnetic fields, including 5G, in the city of Columbia, SC, USA. *World Academy of Sciences Journal*, 4(3), 1-25. <https://doi.org/10.3892/wasj.2022.157>
- Lala, A., Kamo, B., Jorgi, J., & Agastra, E. (2018). Modeling of radio base stations with the numerical fdtd method, for the electromagnetic field evaluation. *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, 17, 968 - 977. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-75928-9\\_89](https://doi.org/10.1007/978-3-319-75928-9_89)
- Li, S., Cui, G., & Guo, S. J. (2020). On the Electromagnetic Diffraction Propagation Model and Applications. *IEEE*, 13, 884-895. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2020.2974529>

- Li, S., Cui, G., Guo, S., & Jia, C. (2020). On the Electromagnetic Diffraction Propagation Model and Applications. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, *13*, 884-895.  
<https://doi.org/10.1109/JSTARS.2020.2974529>
- Massa, A., Benoni, A., Ru, P., Goudos, S., Li, B., Oliveri, G., & Polo, A. (2021). Designing Smart Electromagnetic Environments for Next-Generation Wireless Communications. *Telecom*, *2*(2), 213-221.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.3390/telecom2020014>
- Maulud, D., & Abdulazeez, A. (2020). A Review on Linear Regression Comprehensive in Machine Learning. *JASTT*, *1*(2), 140-147.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.38094/jastt1457>
- Michael, R. (2019). Telecommunications, Electromagnetic Fields, and Human Health. *Environmental Claims Journal*, *31*(2), 93-132.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1080/10406026.2019.1603442>
- Mingyao, C., & Dai, L. (2022). Channel Estimation for Extremely Large-Scale MIMO: Far-Field or Near-Field? *IEEE*, *70*(4), 2663-2677.  
<https://doi.org/10.1109/TCOMM.2022.3146400>
- Mohammad, A., & Abdul, S. (2024). Clustered jamming and antenna beam-width fluctuations for UAV-assisted cellular networks. *Computer Networks*, *240*(110171), 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2024.110171>
- Obukhov, V. (2022). Maxwell's Equations in Homogeneous Spaces for Admissible Electromagnetic Fields. *Universe*, *8*(4), 245.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.3390/universe8040245>
- Ojaroudi Parchin, N., Alibakhshikenari, M., Jahanbakhsh Basherlou, H., A. Abd-Alhameed, R., Rodriguez, J., & Limiti, E. (2019). MM-Wave Phased Array Quasi-Yagi Antenna

- for the Upcoming 5G Cellular Communications. *Appl. Sci*, 9(5), 978. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/app9050978>
- Ojoraoudi, N., Jahanbakhsh, Yasir, A., & Alnameed, R. (2020). A broadband multiple-input multiple-output loop antenna array for 5G cellular communications. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 127. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aeue.2020.153476>
- Pawlakl, P., & Zurek, J. (2019). On Measuring Electromagnetic Fields in 5G Technology. *IEEE*, 7, 29826-29835. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2902481>
- Pazmiño, L., Flores, F., Becerra, F., Cevallos, G., & Rivera, R. (2023). Challenges and Opportunities of 5G Deployment in Ecuador (extended version). *Kalpa Publications in Computing*, 15, 58-70. <https://easychair.org/publications/download/WJ2k>
- Permyakov, V., Mikhailov, M., & Malevich, E. (2019). Analysis of Propagation of Electromagnetic Waves in Difficult Conditions by the Parabolic Equation Method. *IEE*, 67(4), 2167-2175. <https://doi.org/10.1109/TAP.2019.2905674>
- Qiu, L., Zhentang, L. W., He, X., Feng, J., & Baolin, L. (2020). Early-warning of rock burst in coal mine by low-frequency electromagnetic radiation. *Engineering Geology*, 279(20), 105755. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.10575>
- Ramirez, R., & Escobar, I. (2020). Measurements and Analysis of Personal Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields at Outdoor and Indoor School Buildings: A Case Study at a Spanish School. *IEEE*, 8, 195692-195702. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3033800>
- Rangkooy, H., Mahmati, A., & Dehaghi, B. (2023). Base transceiver station antenna exposure and workers' health. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 29(2), 863 - 868. <https://doi.org/10.1080/10803548.2022.2085892>

- Ravinesh, D., Zaher, Y., Nadhir, A., T, N., & Galligan, L. (2020). Modern Artificial Intelligence Model Development for Undergraduate Student Performance Prediction: An Investigation on Engineering Mathematics Courses. *IEEE Access*, 8, 136697-136724. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3010938>
- Rebato, M., PArk, J., & Popovski, P. (2019). Stochastic Geometric Coverage Analysis in mmWave Cellular Networks With Realistic Channel and Antenna Radiation Models. *Stochastic Geometric Coverage Analysis in mmWave Cellular Networks With Realistic Channel and Antenna Radiation Models.*, 67(5), 3736-3752. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2019.2895850>
- Roy, T., Oshea, T., & West, N. (2019). Generative Adversarial Radio Spectrum Networks. *Association for Computing Machinery*, 12–15. <https://doi.org/https://doi.org/10.1145/3324921.3328782>
- Scott, J., & Mustillo, S. (2021). Using Predictions and Marginal Effects to Compare Groups in Regression Models for Binary Outcomes. *Sociological Methods & Research*, 50(3), 1284-1320. <https://doi.org/https://doi.org/10.1177/0049124118799374>
- Skouroumounis, C., & Krikidis, I. (2023). Fluid Antenna With Linear MMSE Channel Estimation for Large-Scale Cellular Networks. *IEEE Transactions on Communications*, 71(2), 1112-1125. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2022.3230861>
- Suzuki, J. (2020). Nonlinear Regression. *Springer, Singapore*, 117-146. [https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-981-15-7568-6\\_7](https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-981-15-7568-6_7)
- Terza, J. (2020). Regression-Based Causal Analysis from the Potential Outcomes Perspective. *Journal of Econometric Methods*, 9(1), 20180030. <https://doi.org/https://doi.org/10.1515/jem-2018-0030>

- Wall, S., Wang, Z., Kendig, T., Dobraca, D., & Lipsett, M. (2019). Real-world cell phone radiofrequency electromagnetic field exposures. *Environmental Research*, *171*, 581-592. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.09.015>
- Yang, J., Ding, M., & Mao, G. (2019). Optimal Base Station Antenna Downtilt in Downlink Cellular Networks. *IEEE*, *18*(3), 1779-179. <https://doi.org/10.1109/TWC.2019.2897296>
- Zhang, H., Shlezinger, N., & Guidi, F. (2022). Beam Focusing for Near-Field Multiuser MIMO Communications. *IEEE*, *21*(9), 7476-7490. <https://doi.org/10.1109/TWC.2022.3158894>