

Transformador de distribución nuevo diseño para zona tropical

Horacio Torres-Sánchez

Profesor Titular y Especial

***Programa de investigación sobre Adquisición y Análisis de
Señales - PAAS-UN***

Universidad Nacional de Colombia

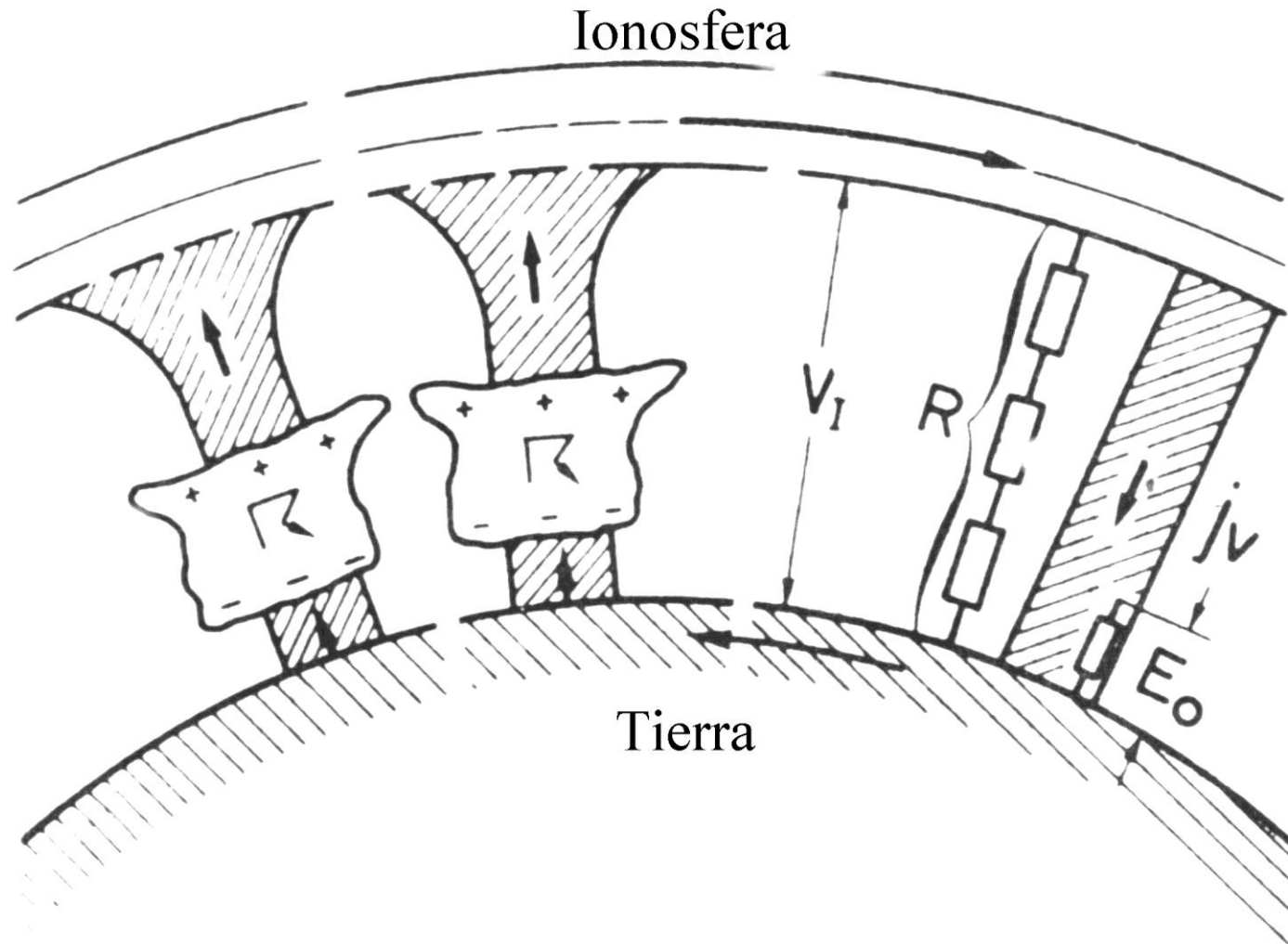
Asunción, Mayo de 2012

Contenido

1. *Marco de referencia: Situación y caracterización del entorno (2 horas).*
2. *Metodología Integral (3 horas)*
 - *Diagnóstico Integral del problema,*
 - *Alternativas tecnológicas e Implementación de la solución,*
 - *El Control y monitoreo de variables*
3. *Perspectivas y trabajos futuros (1 hora)*

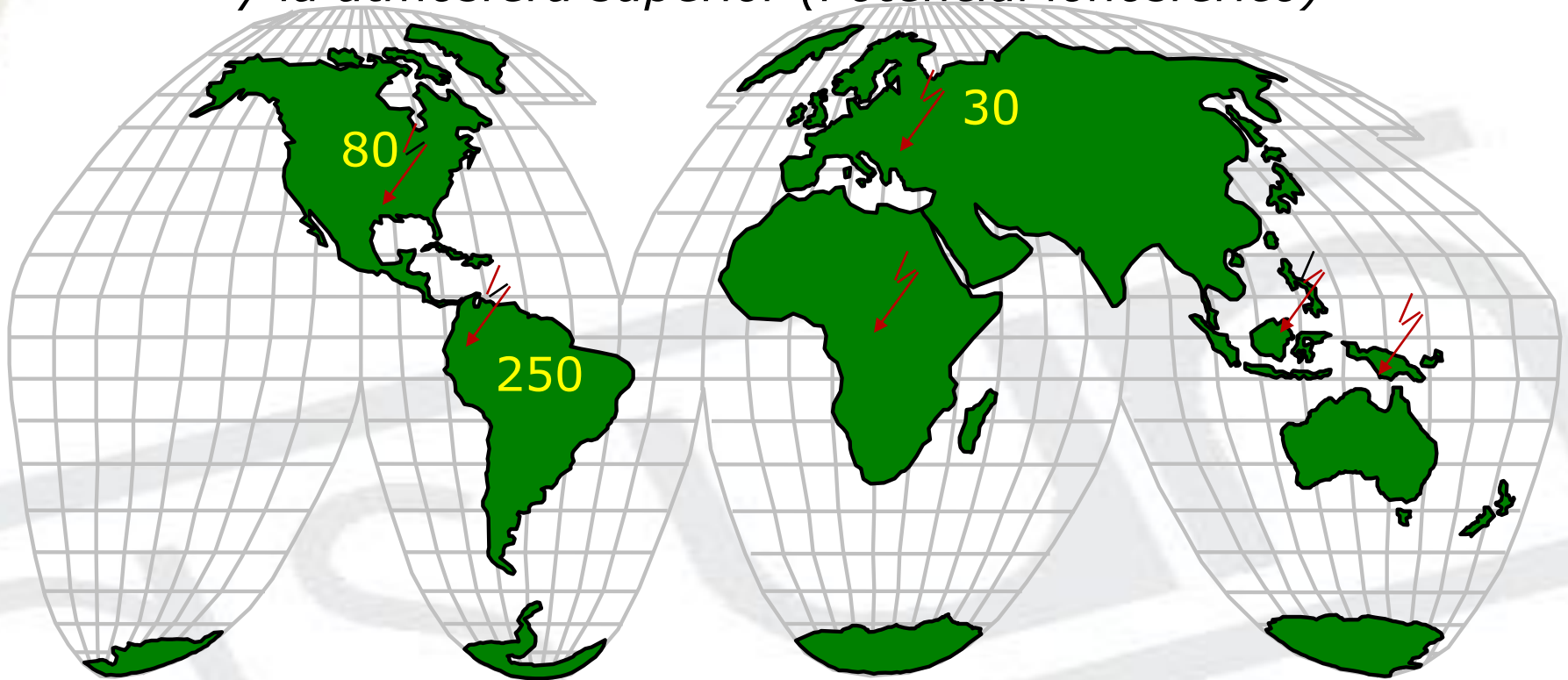
1. Marco de referencia: Situación y caracterización del entorno

Circuito Eléctrico Global de Wilson



Hipótesis de Wilson

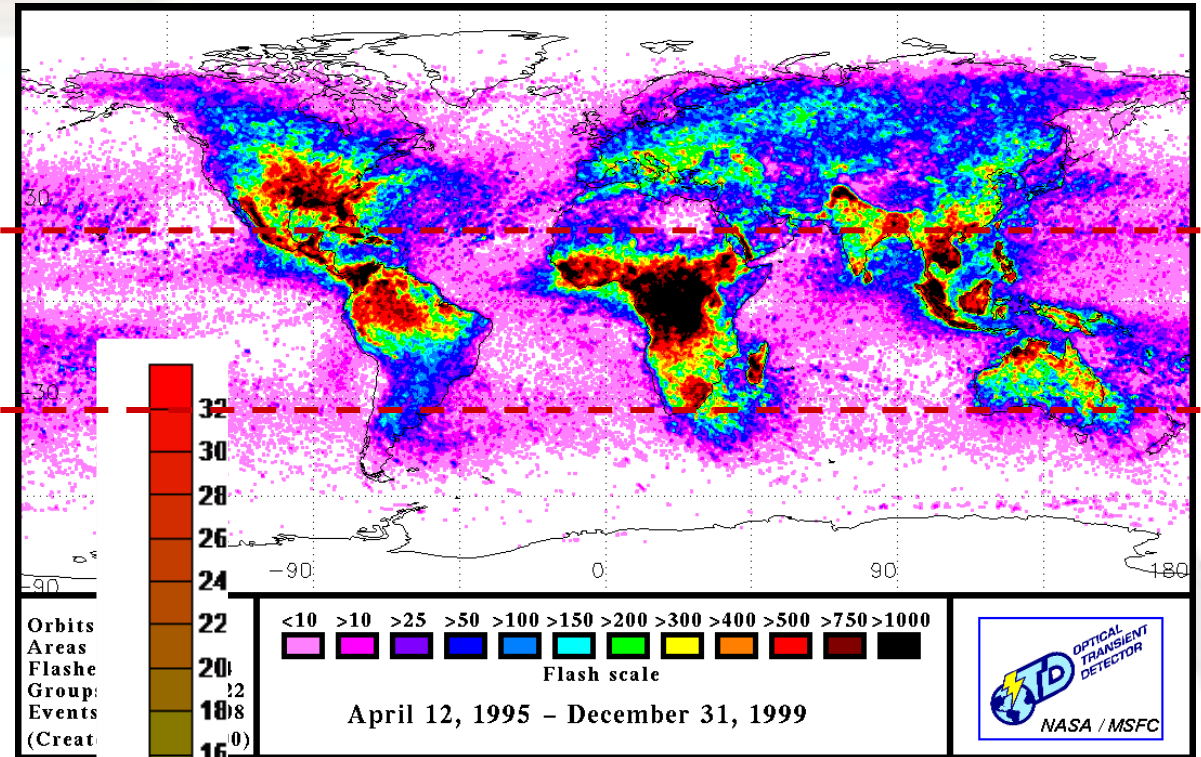
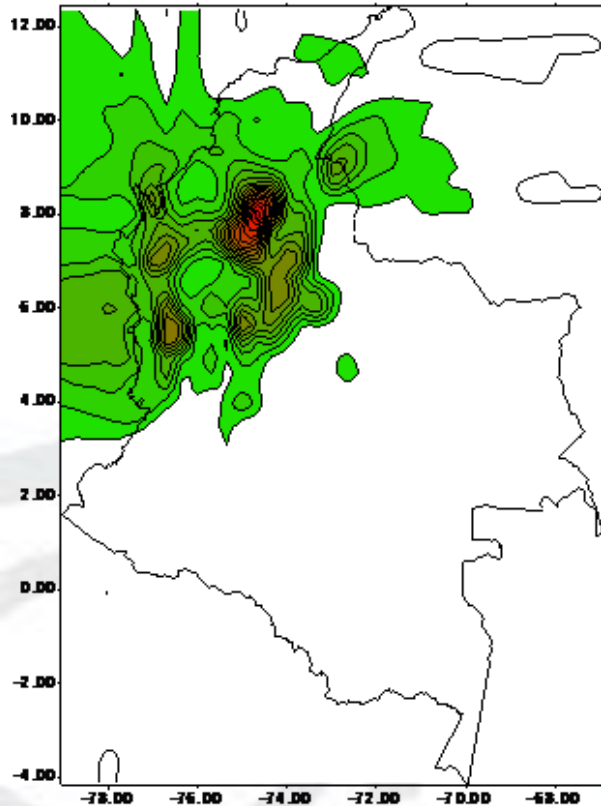
"Las descargas eléctricas atmosféricas son generadores de carga que mantienen la diferencia de potencial entre la tierra y la atmósfera superior (Potencial ionosférico)"



"La contribución al circuito global está dominado por una superposición de efectos de las tres mayores zonas de convección:

Suramérica Tropical, Centro de África y el Continente Marítimo"

La problemática: Actividad de rayos



☐ Sobre la tierra se presentan 100 rayos cada segundo.

☐ Las magnitudes de los parámetros del rayo varían espacial y temporalmente (H. Torres, 2002)

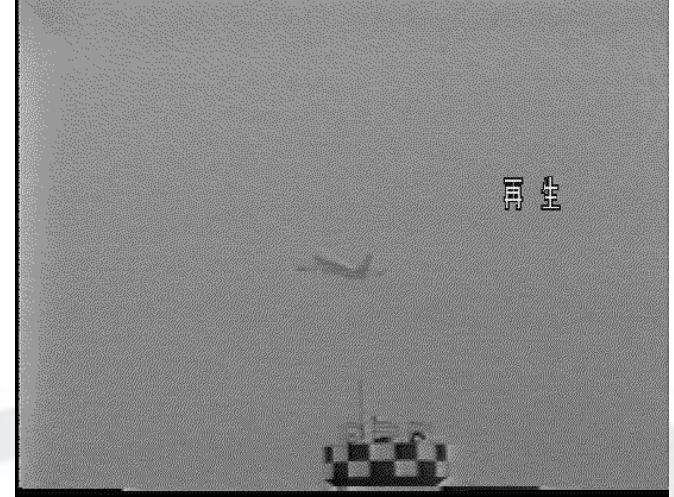
Hipótesis de investigación

"Las magnitudes de los parámetros de la descarga eléctrica atmosférica utilizados en aplicaciones en ingeniería (Nivel Cerámico, Densidad de Rayos a Tierra, Polaridad, Corriente de Retorno de Rayo y Rata de Ascenso de la Corriente de Rayo) varían espacial y temporalmente. "

Torres, H. "El Rayo", Ed. UNIBIBLOS, Bogotá, 2002

¿Que tan frecuentes son los problemas por rayos? (Cummins, Chisholm, Sept. 2006)

Las aerolíneas comerciales son impactadas por rayos, en promedio una vez al año.



Las líneas de transmisión, 100km de longitud, 35 m de altura son impactadas:

- *300 veces por año en la Florida*
- *100 veces por año en la zona central de USA*
- *10 veces por año en California.*

Problemas por rayos en sistemas eléctricos

(Torres, H. 2002)

El costo promedio anual de reposición de transformadores de distribución en Colombia, por impactos de rayo, se estima en US\$7 millones.

Los rayos producen al menos el 50% de los sags (caídas de tensión) en una red de distribución. (EPRI, USA)

La tasa de fallas anuales en líneas de transmisión por causa de rayos varía entre 30 y 60%



La problemática: Índices de mortalidad



EL TIEMPO.COM /

Abril 7 de 2007
**Un rayo mató a un policía y
causó heridas a otros tres, en un
paraje rural de Antioquia**

EL TIEMPO - CALI

Carlos 'El Chumi' Álvarez narró el momento
en el que un rayo causó la muerte a 'Carepa' Gaviria

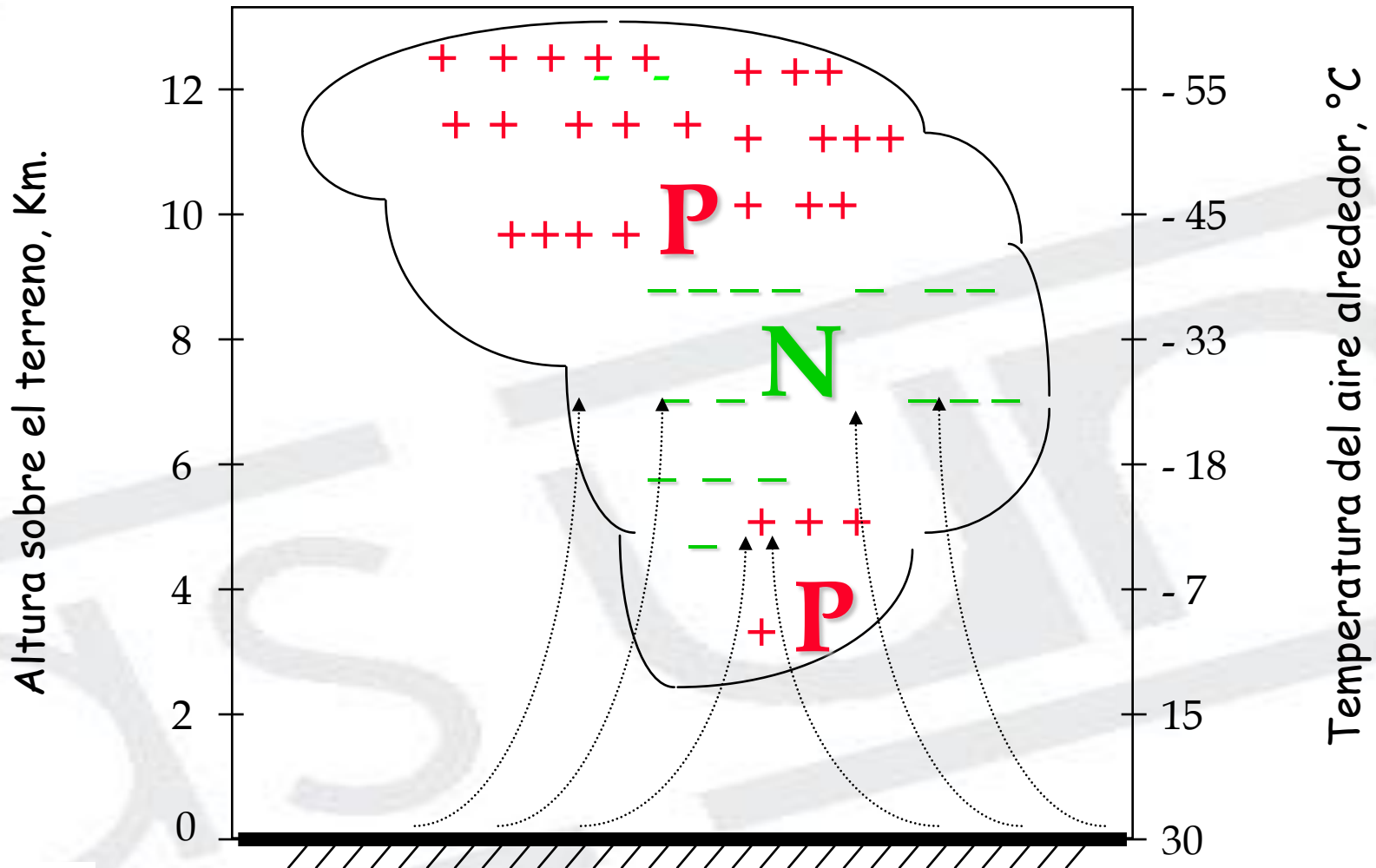
EL ESPECTADOR.COM

26 de Noviembre de 2006 - COLOMBIA
**Heridos por un rayo se
recuperan en Norte de
Santander**

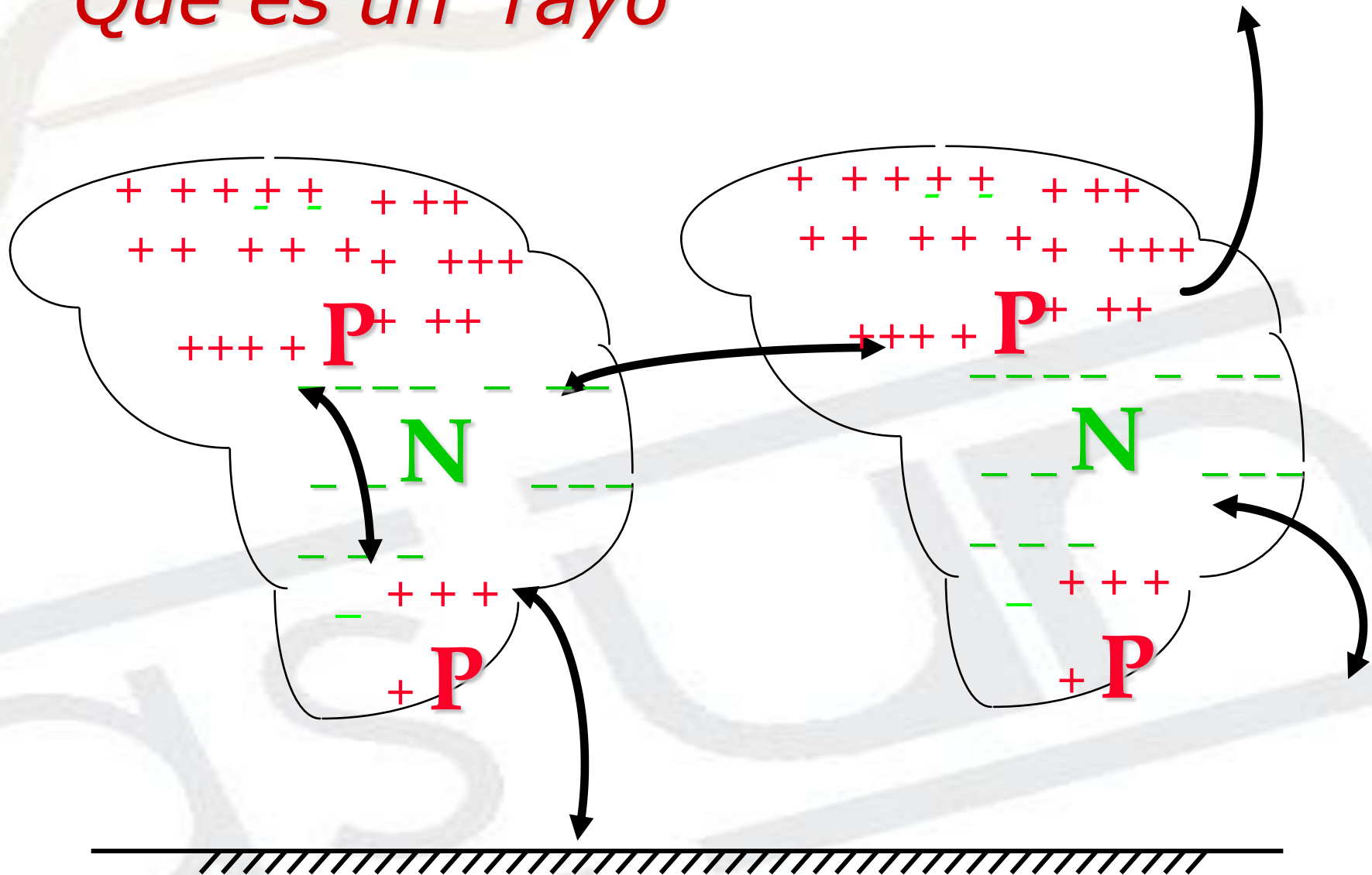
"...En general, las muertes y lesiones por rayos dependen del sistema económico y el mejoramiento en la construcción de las viviendas. En las áreas tropicales y subtropicales del mundo, donde la actividad de rayos es más común, el número total de muertes por rayos se estima en 24.000 y cerca de 240.000 lesionados anualmente..."

(Mary Ann Cooper, MD "Lightning Injuries" October 26, 2005)

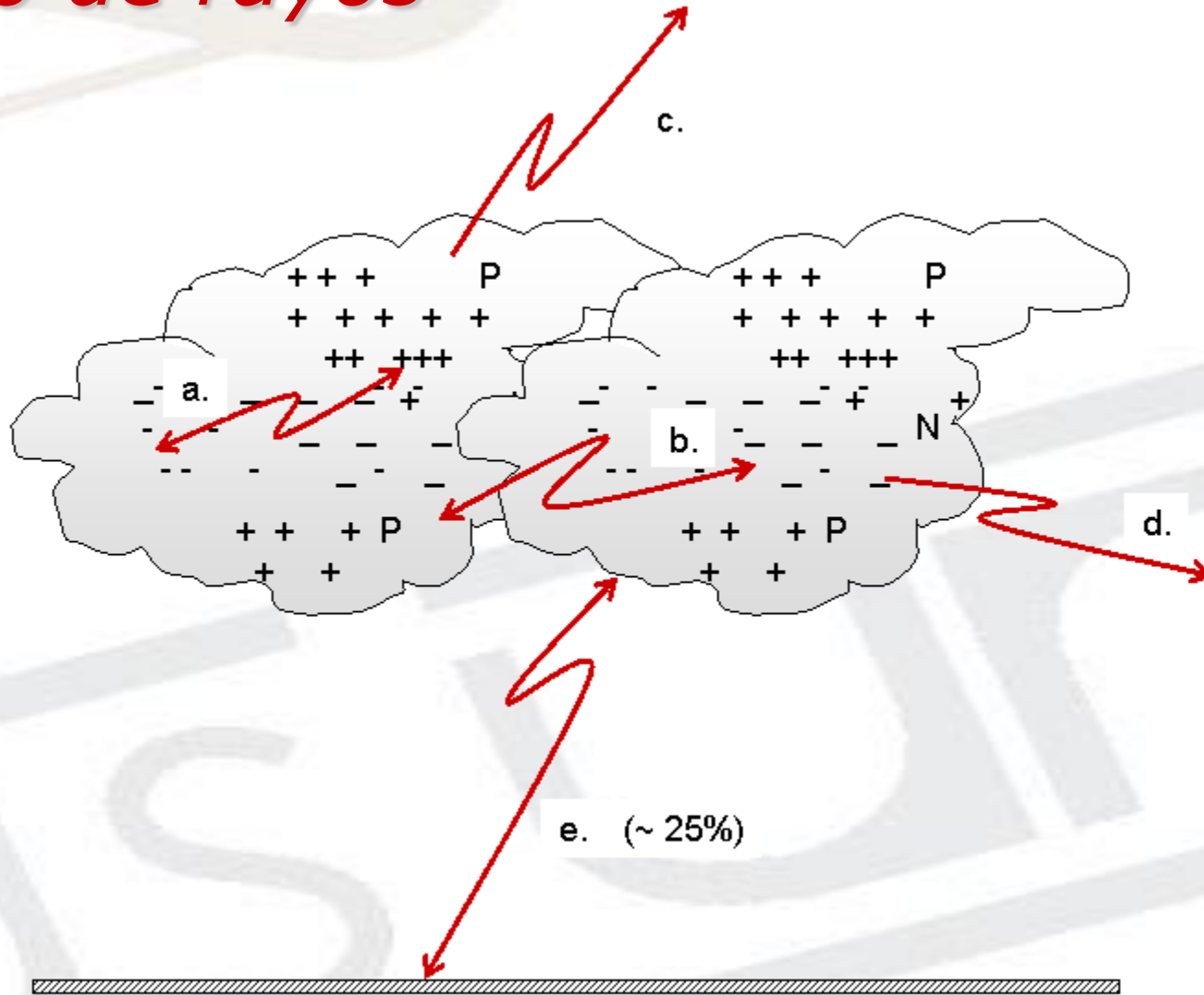
Distribución de carga en la nube



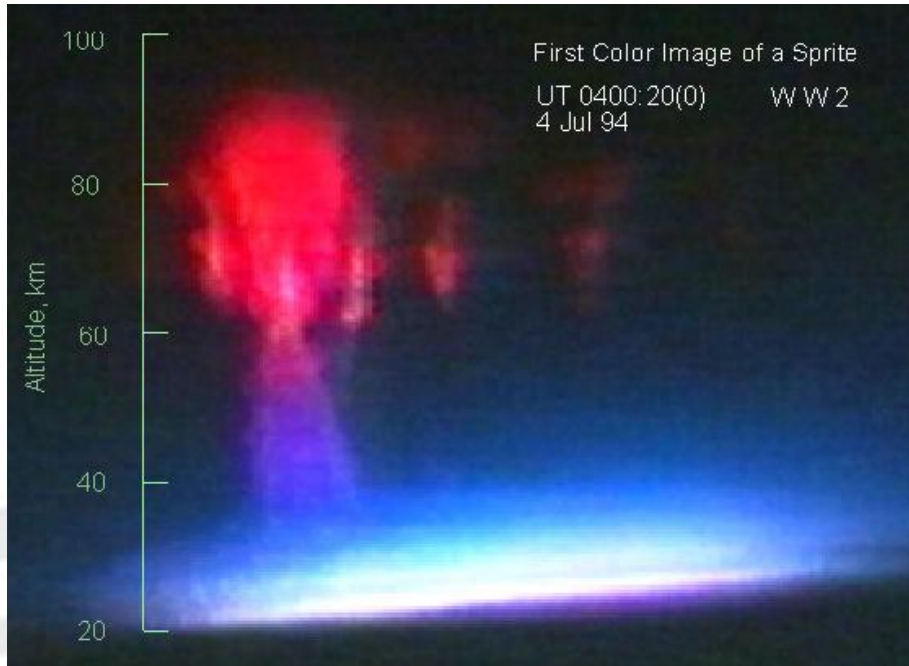
Que es un rayo



Tipo de rayos



Rayos nube-ionosfera: Red Sprites – Blue Jets



Rayos descendentes y ascendentes



a.



b.



Encendido de la descarga



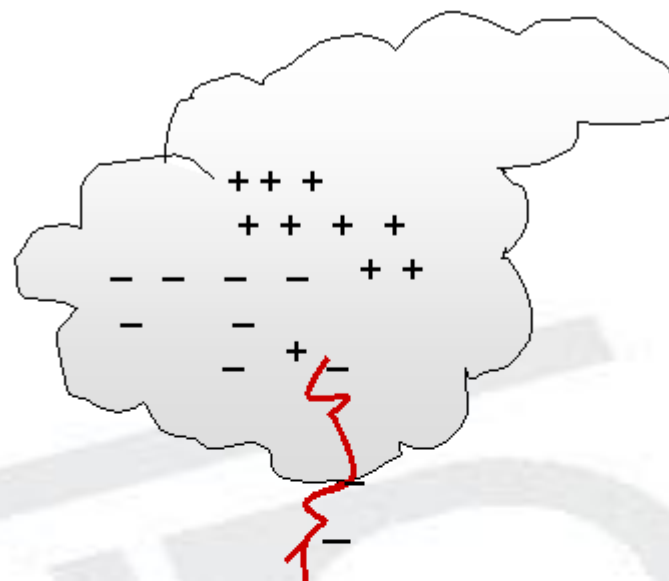
$t = 1 \text{ ms}$



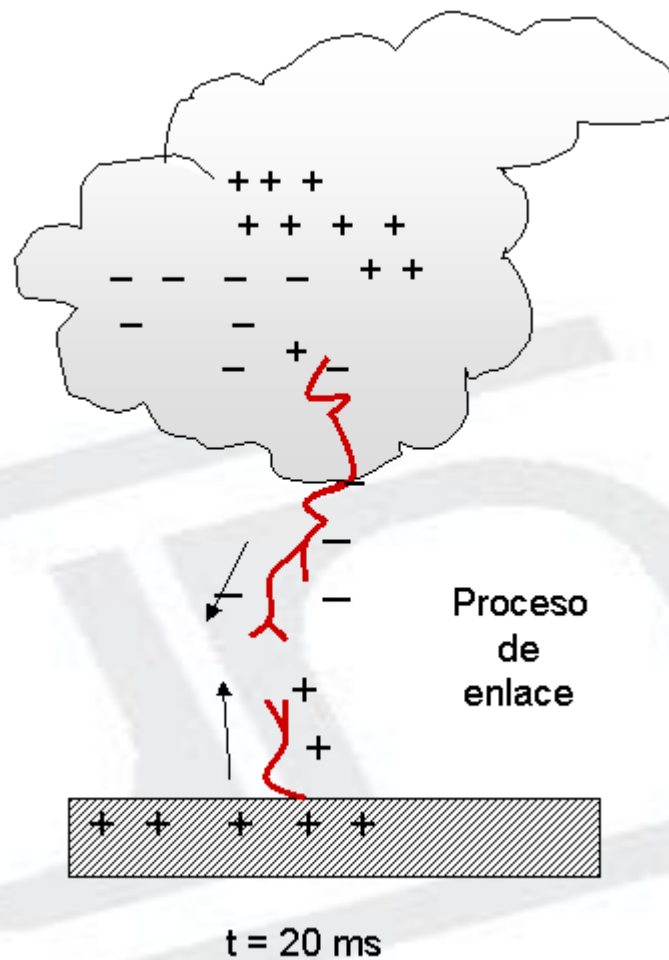
Líder escalonado



$t = 1,10 \text{ ms}$

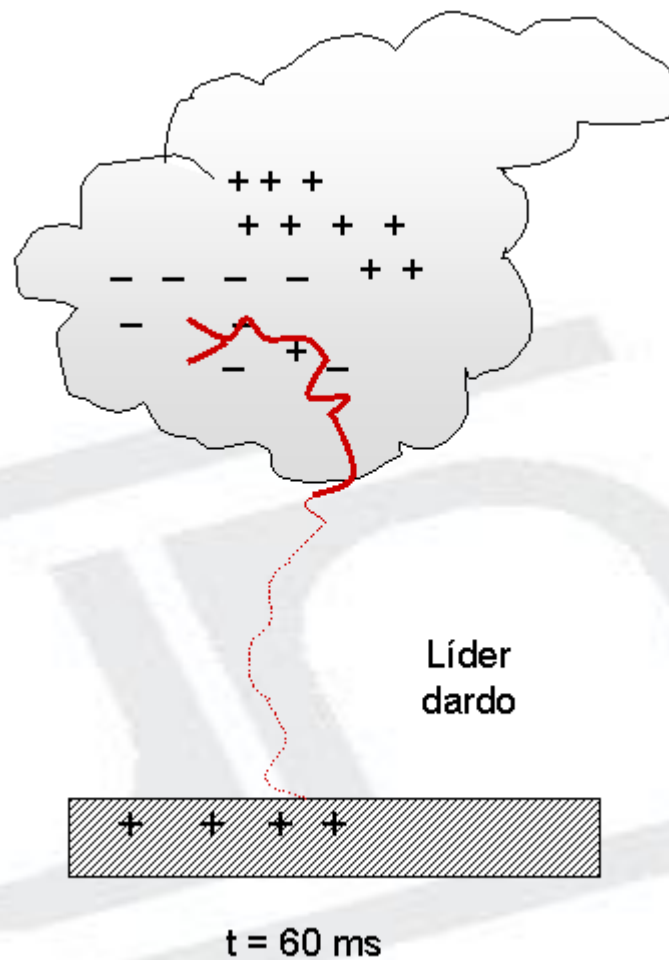


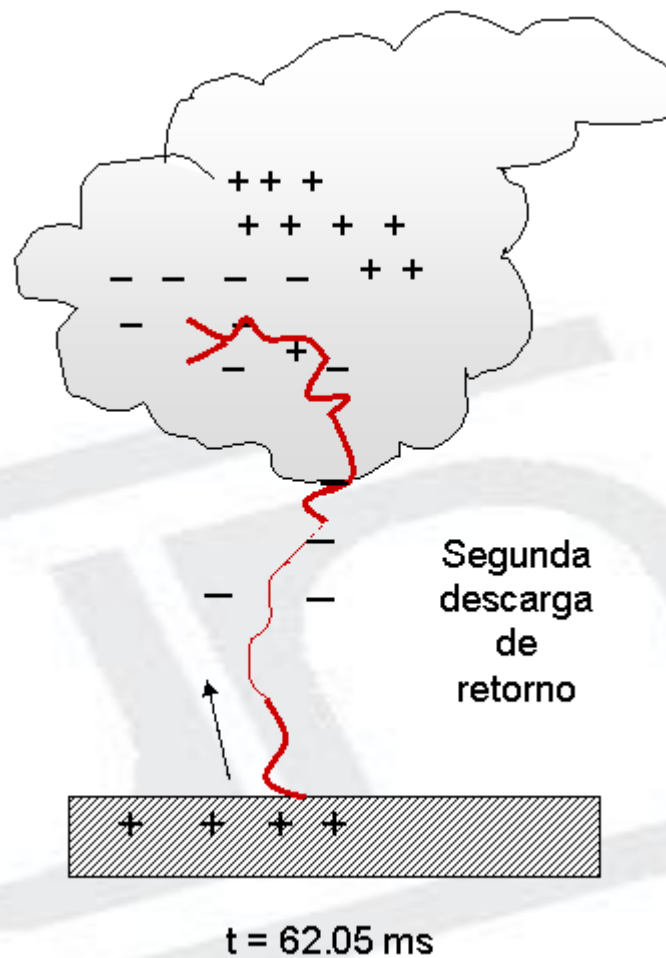
$t = 1,20 \text{ ms}$



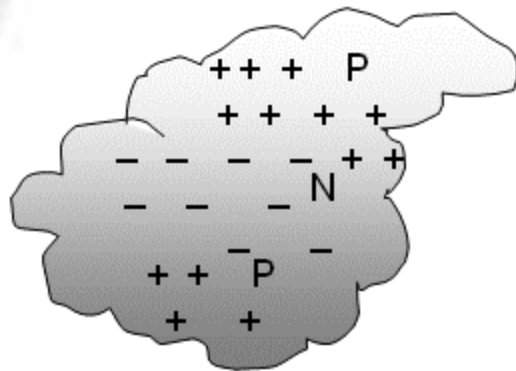


$t = 20.10 \text{ ms}$





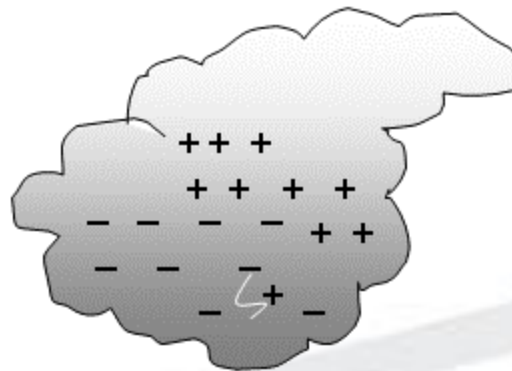
Proceso de la descarga (1/4)



Distribución de carga
en la nube



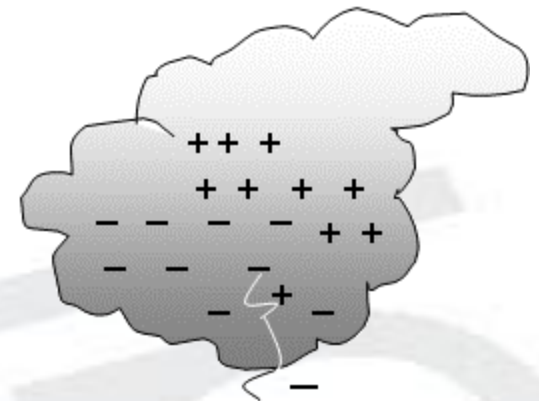
$t = 0$



Encendido de la descarga



$t = 1$ ms

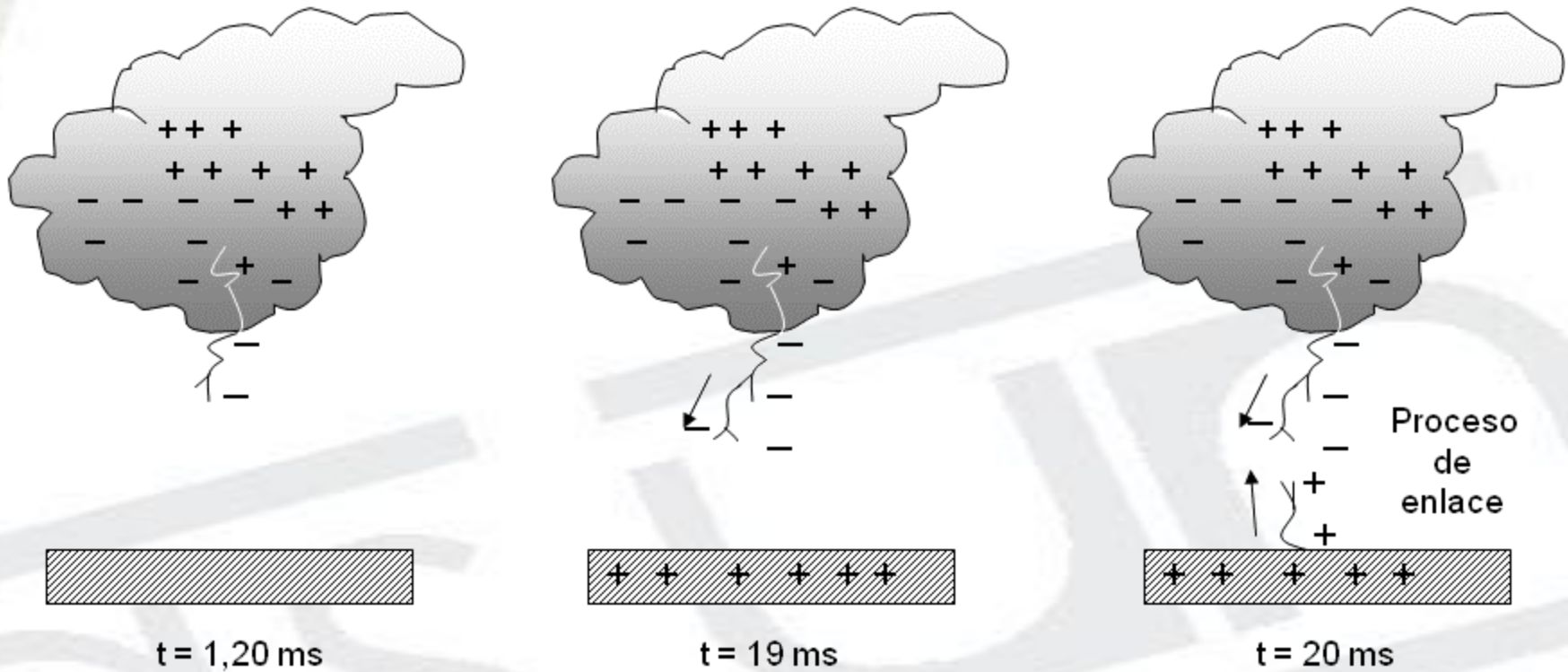


Líder escalonado

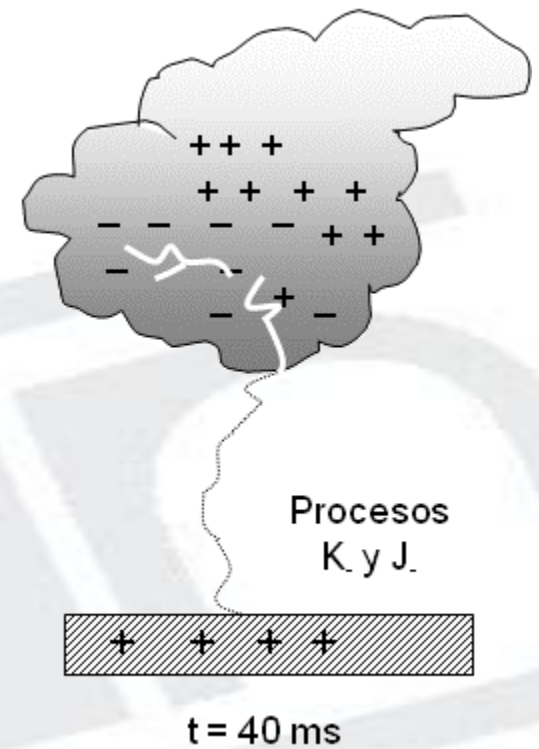
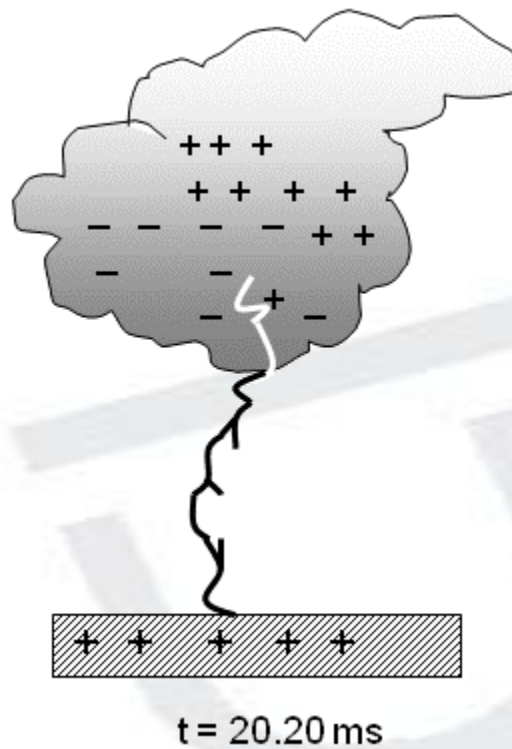
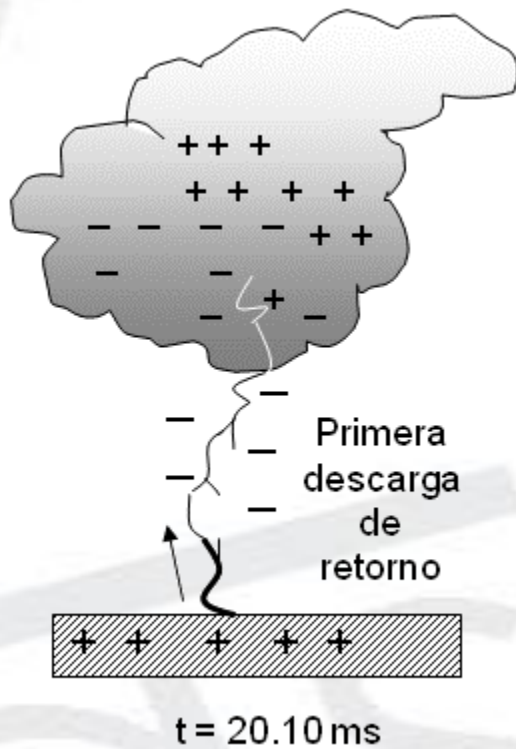


$t = 1,10$ ms

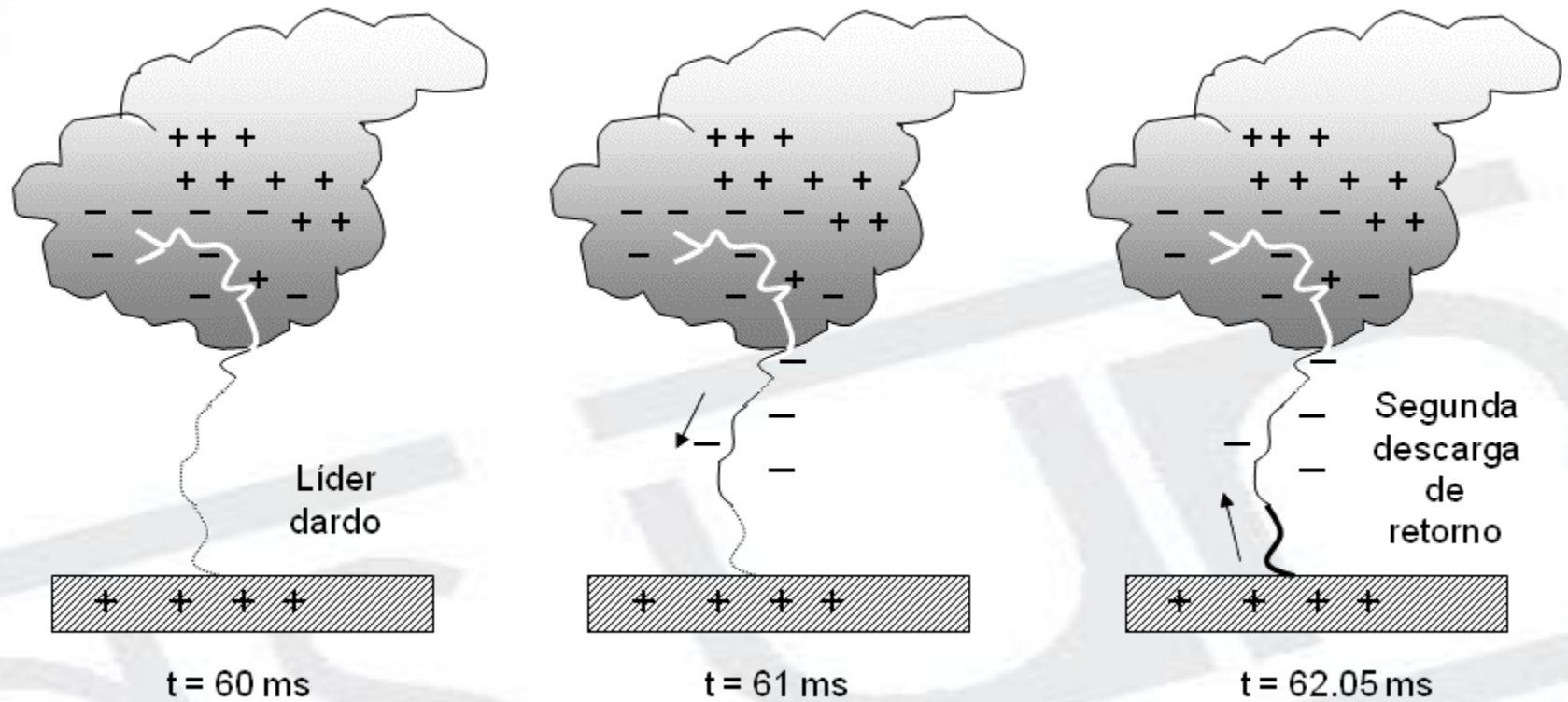
Proceso de la descarga (2/4)



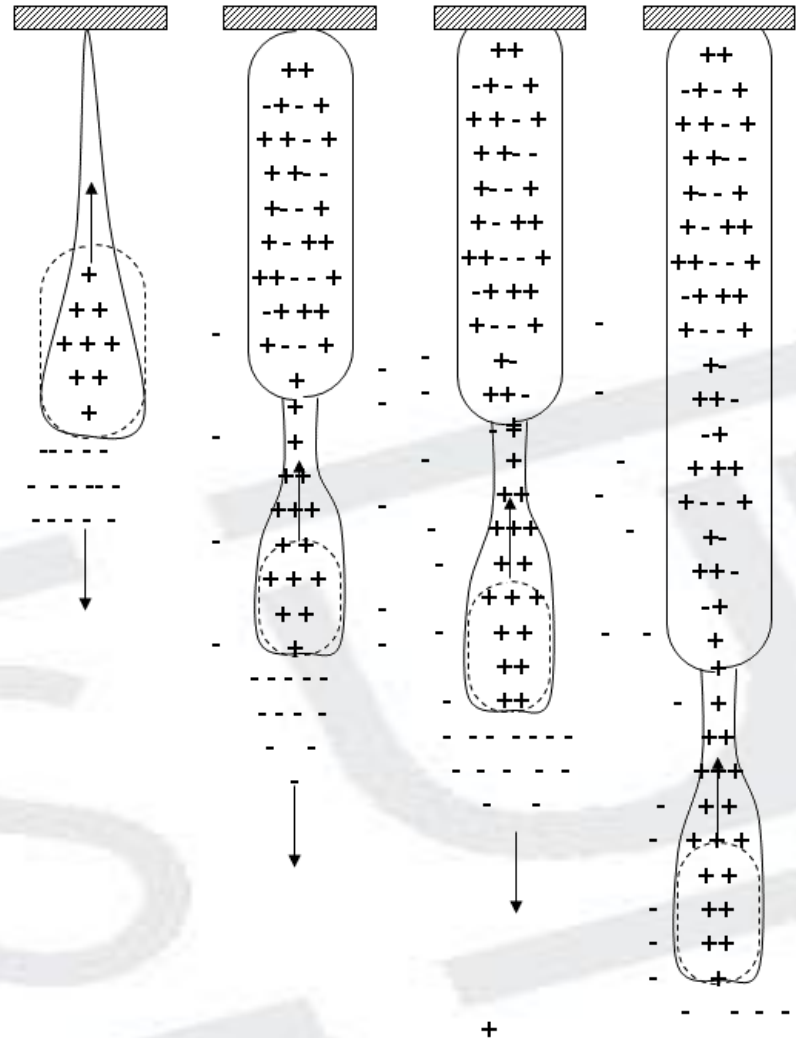
Proceso de la descarga (3/4)



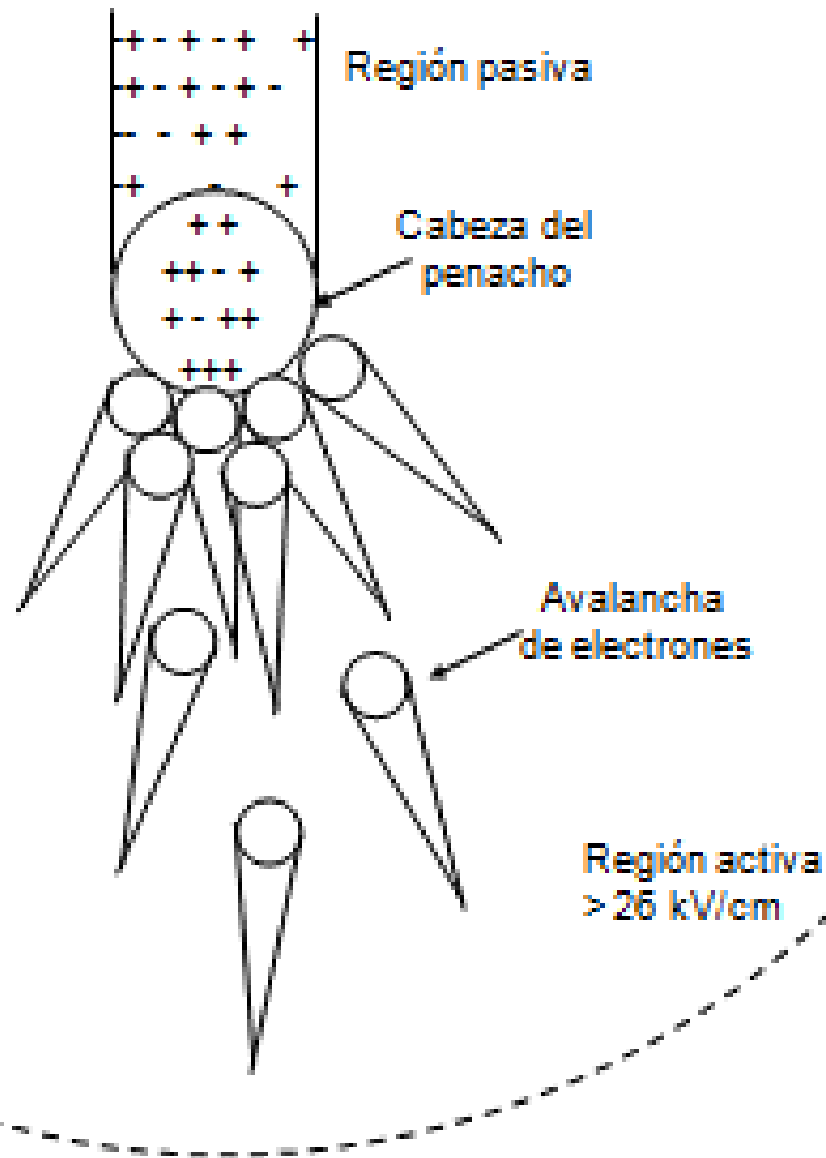
Proceso de la descarga (4/4)

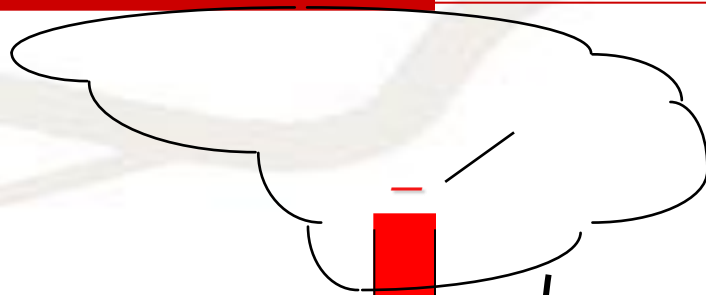


Física de la descarga



Física de la descarga





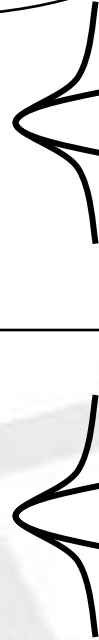
Nube



h_2



h_1



Canal sin efecto corona

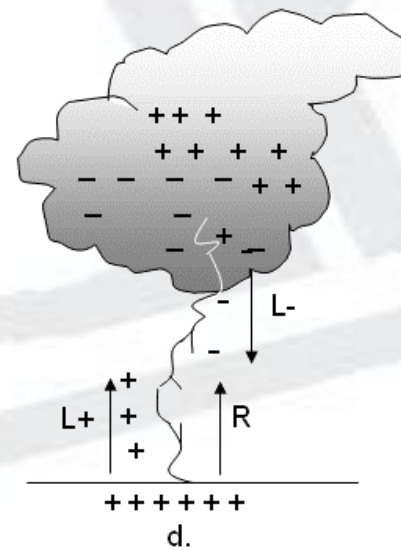
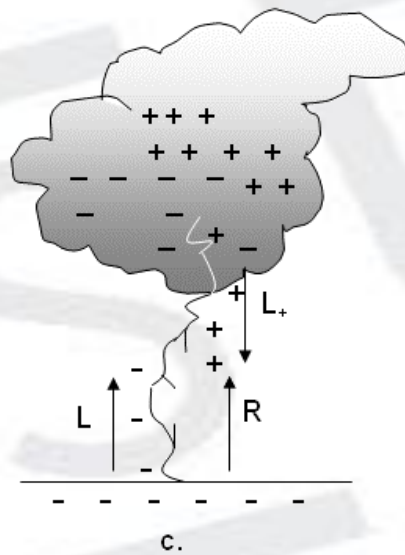
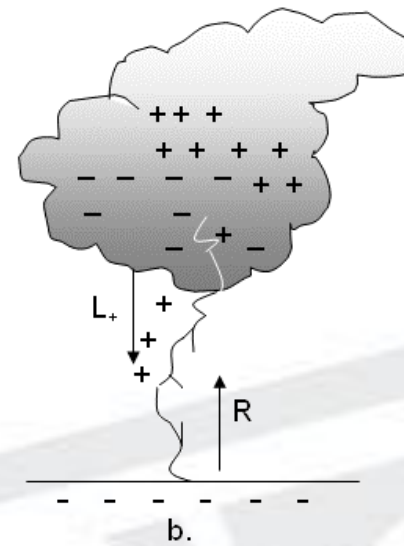
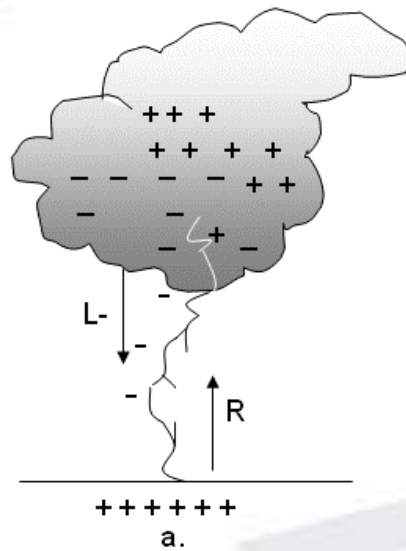
Canal con efecto corona



Punto de acople

Tierra

Tipos de rayos



Proceso de las descargas disruptivas para propósitos de protección

- 1. Encendido de la descarga
(Preliminary breakdown)*
- 2. Líder escalonado
(Stepped leader)*
- 3. Proceso de enlace
(Attachment process)*

□ ...



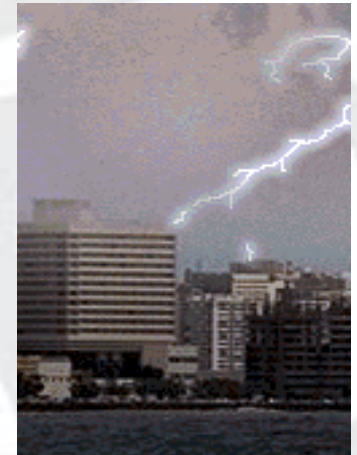
3. Proceso de enlace (Attachment process)

En este proceso se dan 3 etapas:

a. Inicio y propagación de penachos.



b. Transición de penachos a líder y su propagación.



c. Conexión entre líderes descendente y ascendente



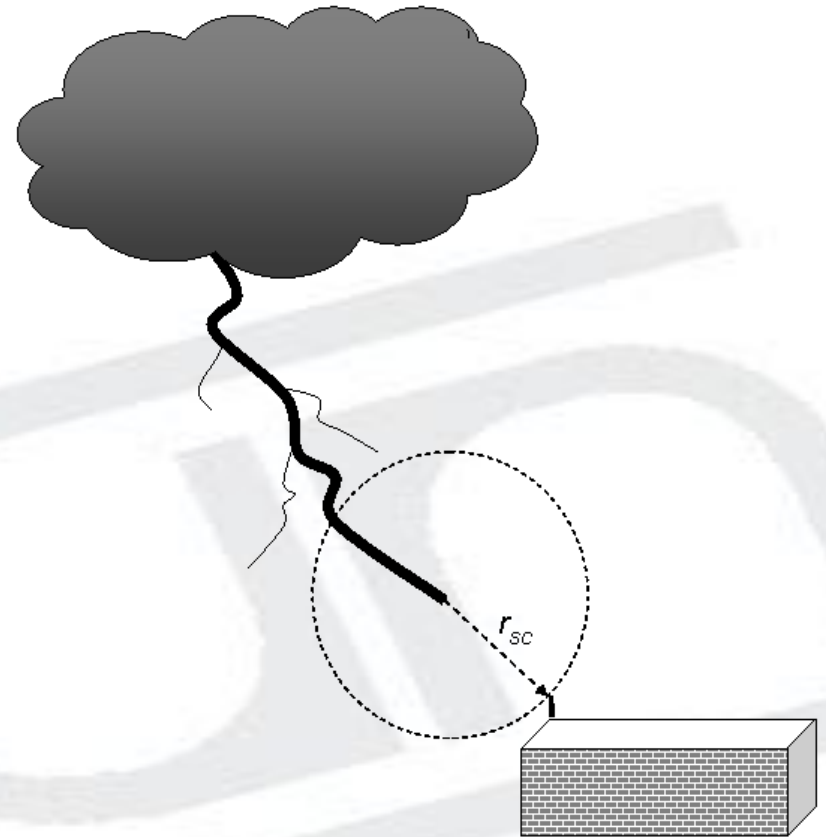
c. salto en el intervalo y transición a una descarga autosostenida

En la actividad de protección de las estructuras contra el rayo, las normas toman en consideración **solamente la tercera etapa** (c) mediante los conceptos:

distancia de cebado, radio de atracción (r_{sc})

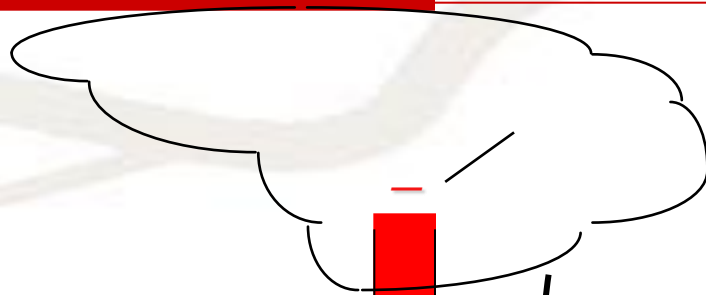
recomendando el uso del modelo electrogeométrico como herramienta para posicionar los captadores en las estructuras.

Es un **modelo incompleto** y objeto de trabajo de numerosos investigadores; tiene la cualidad de la **simplicidad de su manejo**.



$$r_{sc} = A \cdot (i_{\max})^b$$

Autor	Distancia de Impacto a Tierra		Distancia de Impacto a conductor de altura h	
	A	b	A	b
Young et al (1963)	27	0.32	1200/(462-h) A > 27	0.32
Armstrong (1964)	6	0.8	6.7	0.8
Brown (1969)	6.4	0.75	7.1	0.75
Love (1973)	10	0.65	10	0.65
Anderson (1982)	6.4, 8 o 10	0.65	10	0.65
IEEE (1985)	5.12, 6.4 o 8	0.65	8	0.65
Eriksson (1987)	na	na	$0.67h^{0.6}$	0.74
Rizk (1997)	na	na	$1.57h^{0.45}$	0.69



Nube



Canal sin efecto corona



Canal con efecto corona

h_2

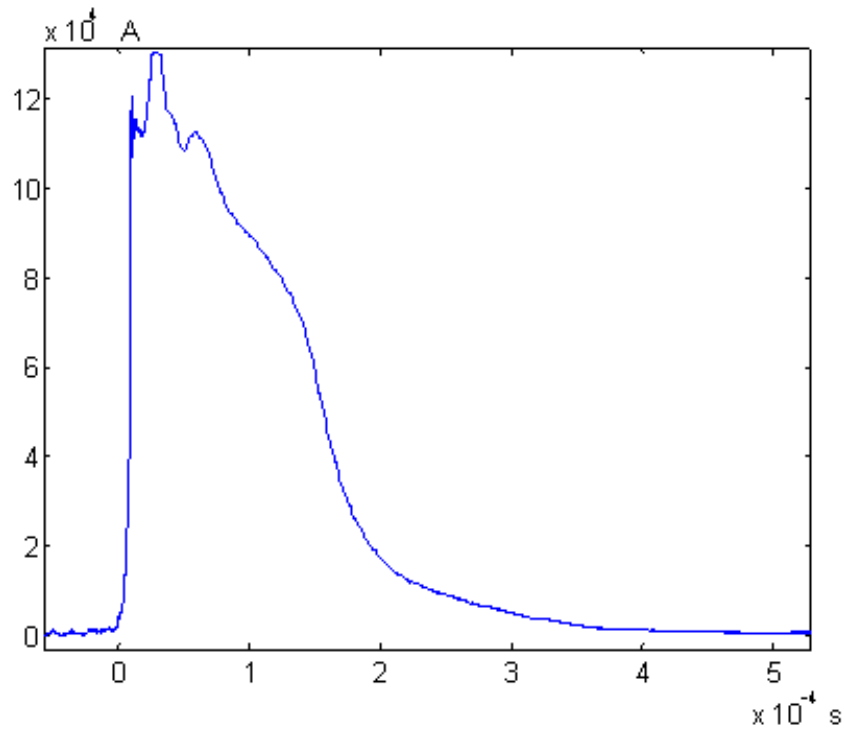
h_1



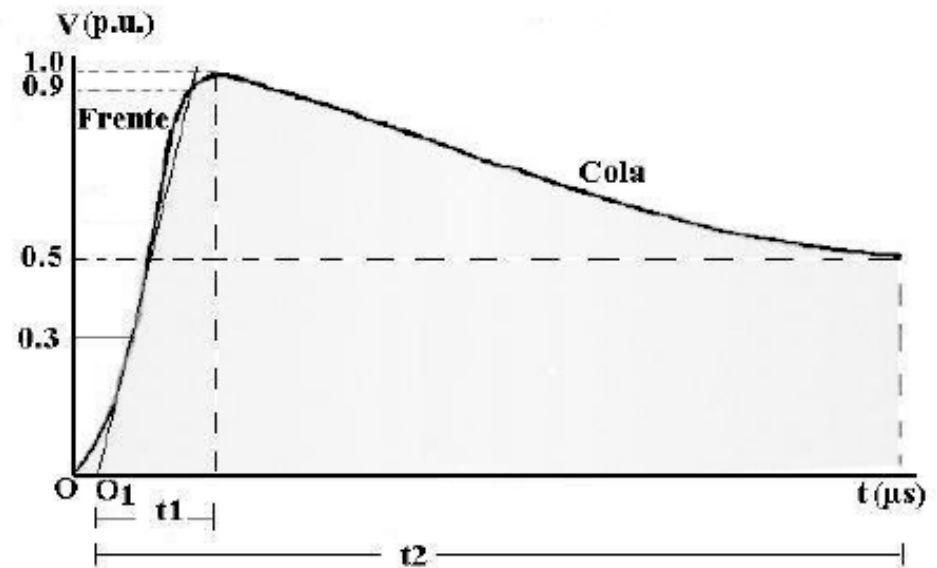
Punto de acople

Tierra

Onda de corriente del rayo

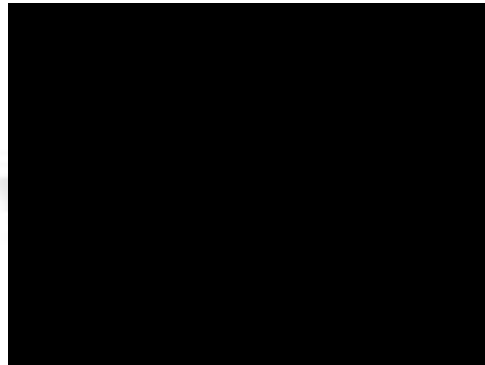


*Onda de corriente medida
Estación Ilyapa - Colombia*



Onda de prueba

Rayo Ilyapa





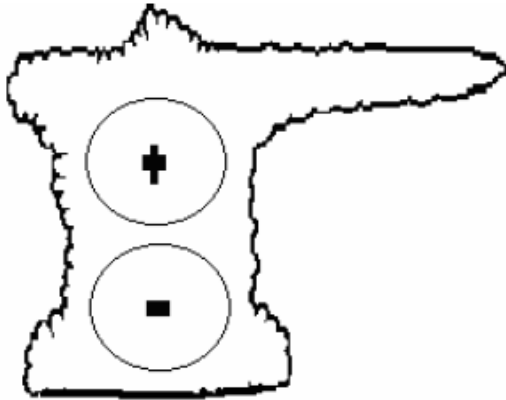
UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

paas un
paas un

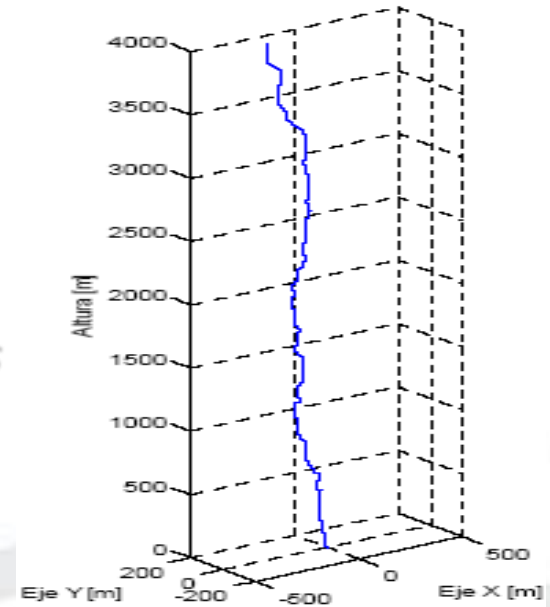
Radios en el proceso de captación



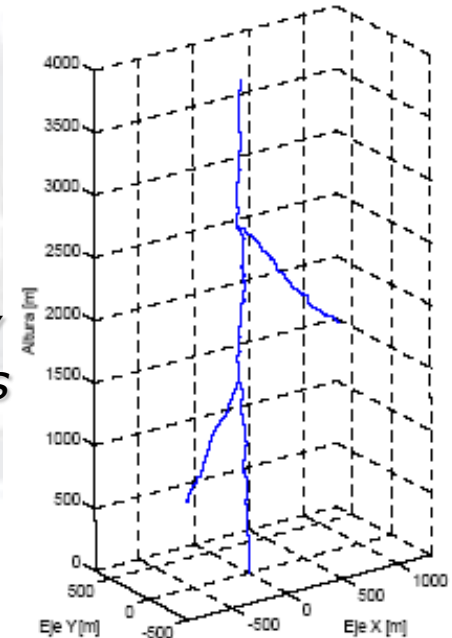
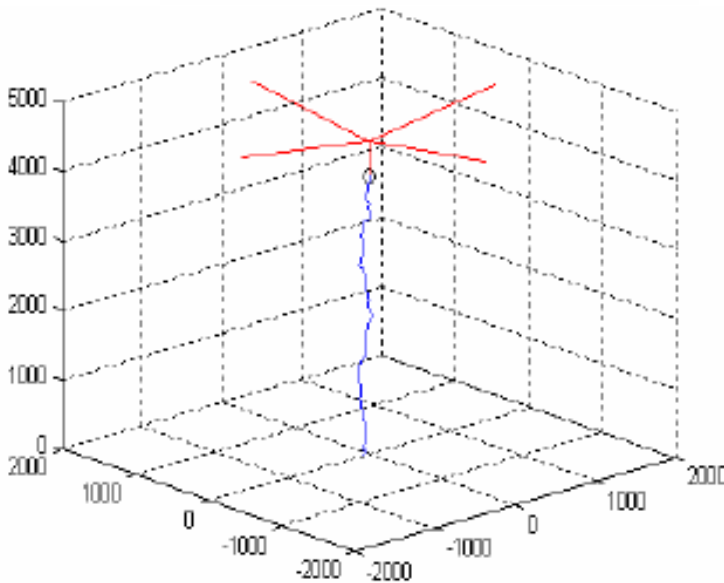
Modelo Bi-lider (PhD PAAS-UN)



*Canales
Tortuosos*



*Canales
Tortuosos y
Ramificados*



Distancia de impacto teniendo en cuenta tortuosidad del canal y ramificaciones NTC4552

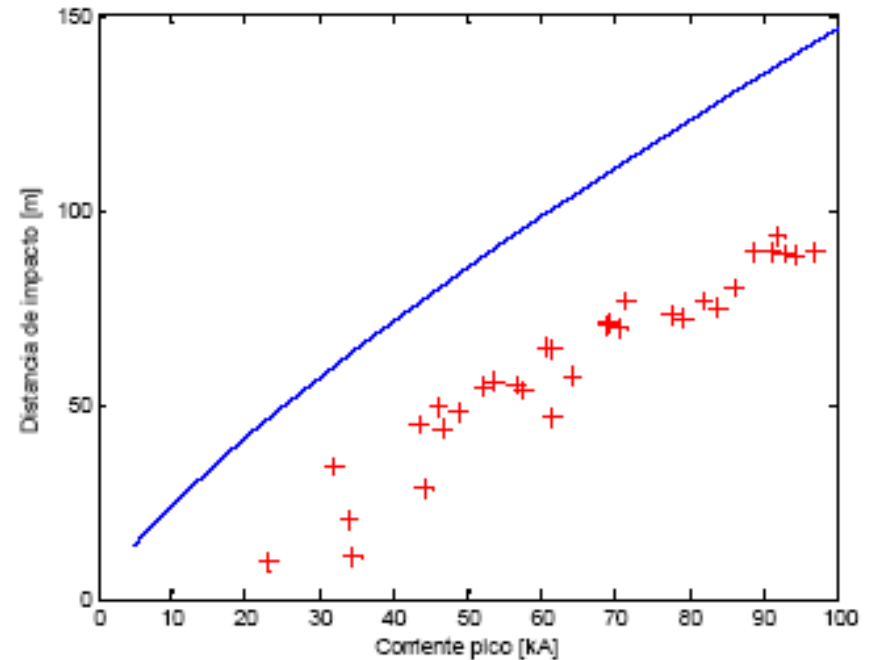
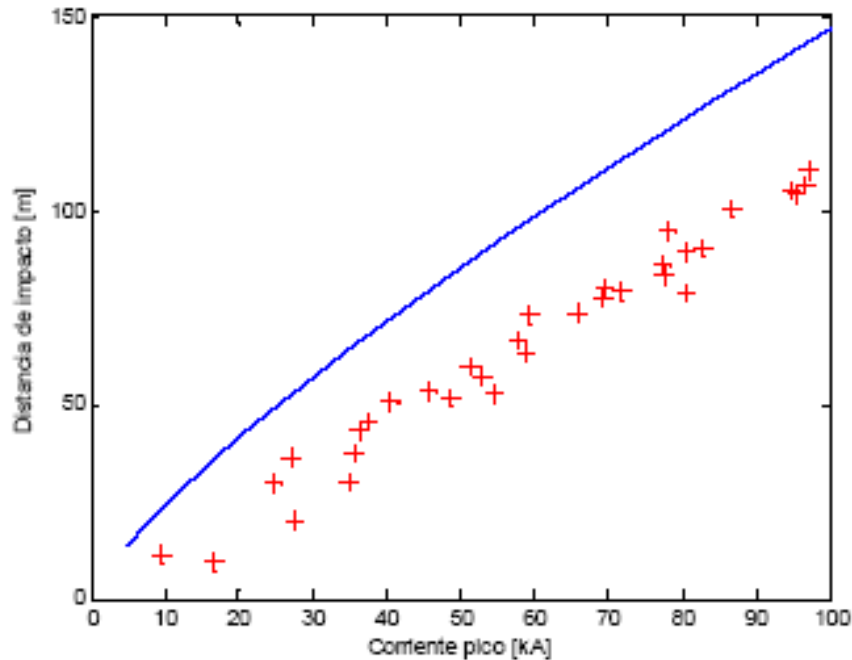
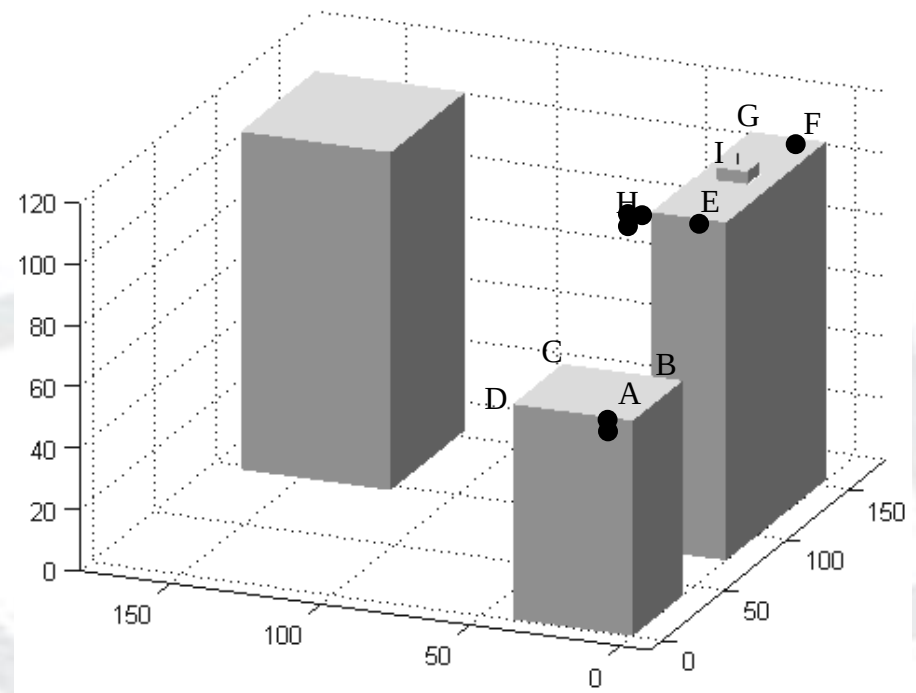
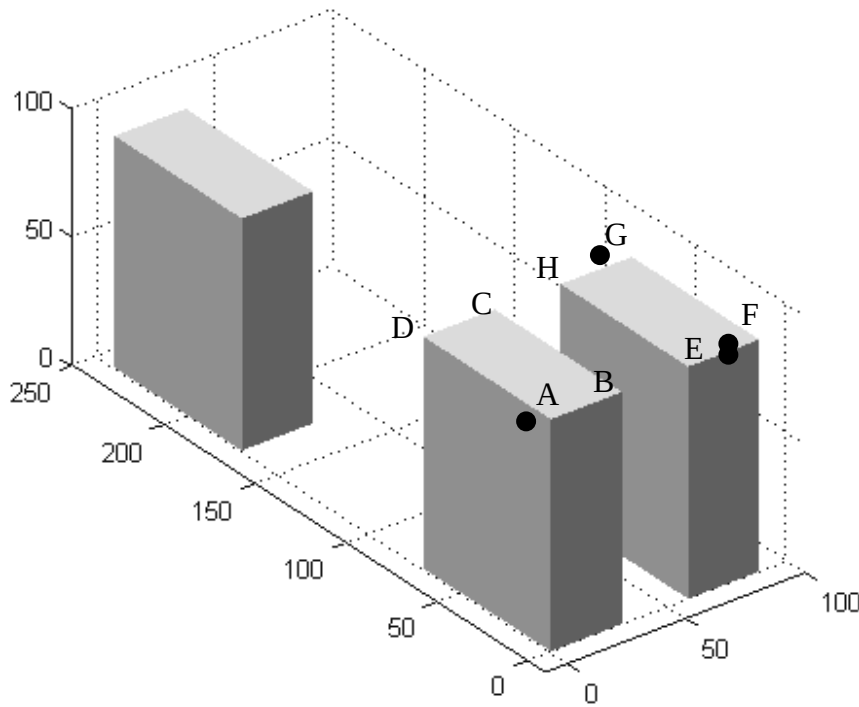


Fig. 6 Distancia de impacto a terreno plano para 2 (izq.) y 3 (der.) ramas
(línea continua: canal recto, cruces: canales tortuosos)

$$r_{sc} = 4 \cdot I^{0.8}$$

Ubicación de impactos observados en edificaciones de Malasia



Porcentaje de impacto directo en estructuras

<i>Localización del impacto</i>	<i>Porcentaje de ocurrencia [%]</i>
<i>Puntas y esquinas</i>	> 80
<i>Bordes horizontales</i>	< 10
<i>Bordes verticales</i>	< 5
<i>Superficies planas</i>	< 1

Probabilidad de impactos directos con canal tortuoso sin y con ramas

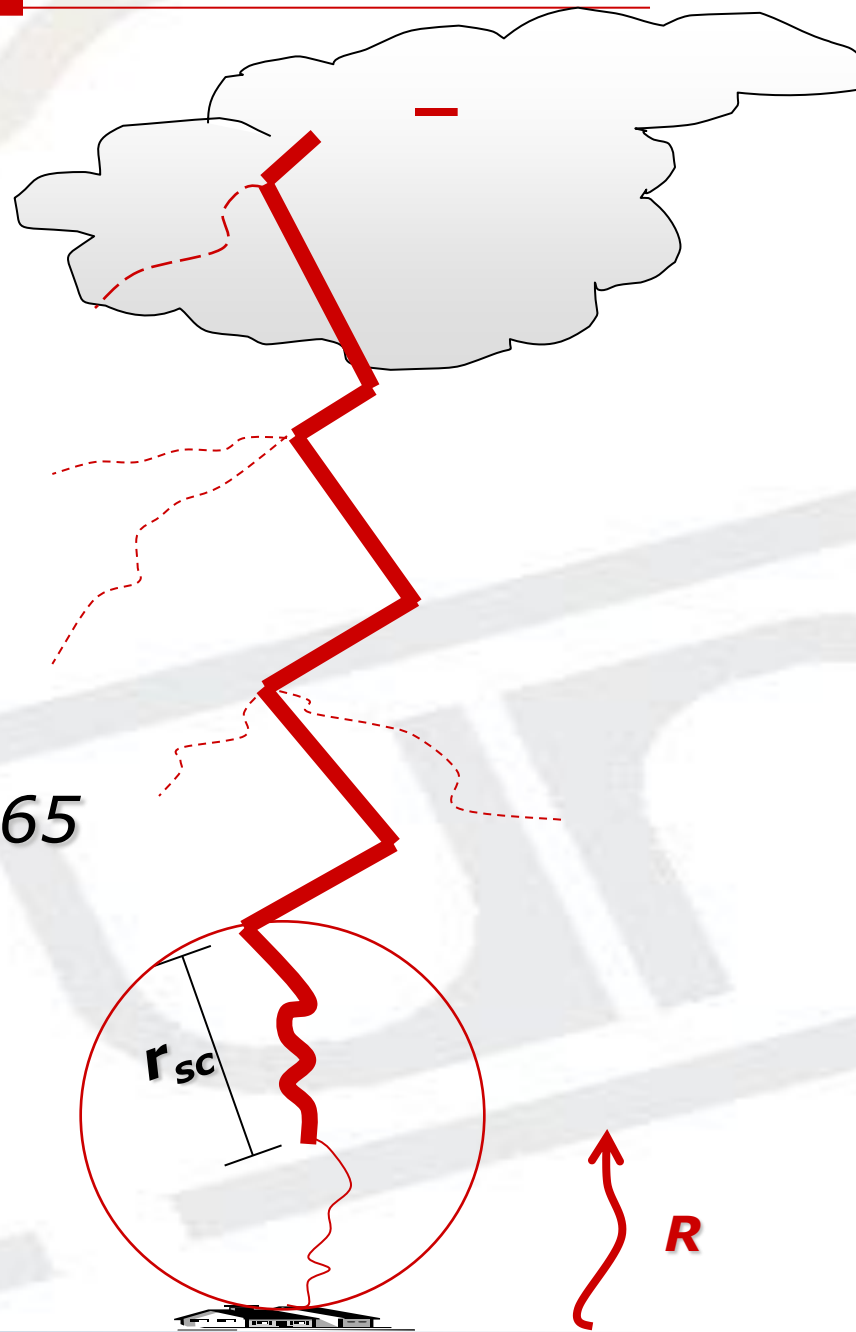
Localización del impacto	Probabilidad estimada de impacto directo [%] sin y con ramas			
	Parámetros de corriente de zona tropical		Parámetros de corriente de zona templada	
	Torres Faber	Edificios bancarios	Torres Faber	Edificios bancarios
Puntas y esquinas	83 / 78	97 / 91	78 / 71	91 / 84
Bordes horizontales	15 / 19	2.8 / 8.4	19.7 / 26	8.8 / 15
Techo plano	1.6 / 2.8	0.25 / 0.3	2.6 / 3.4	0.4 / 0.5

$$r_{sc} = 4 \cdot (i_{min})^{0,8}$$

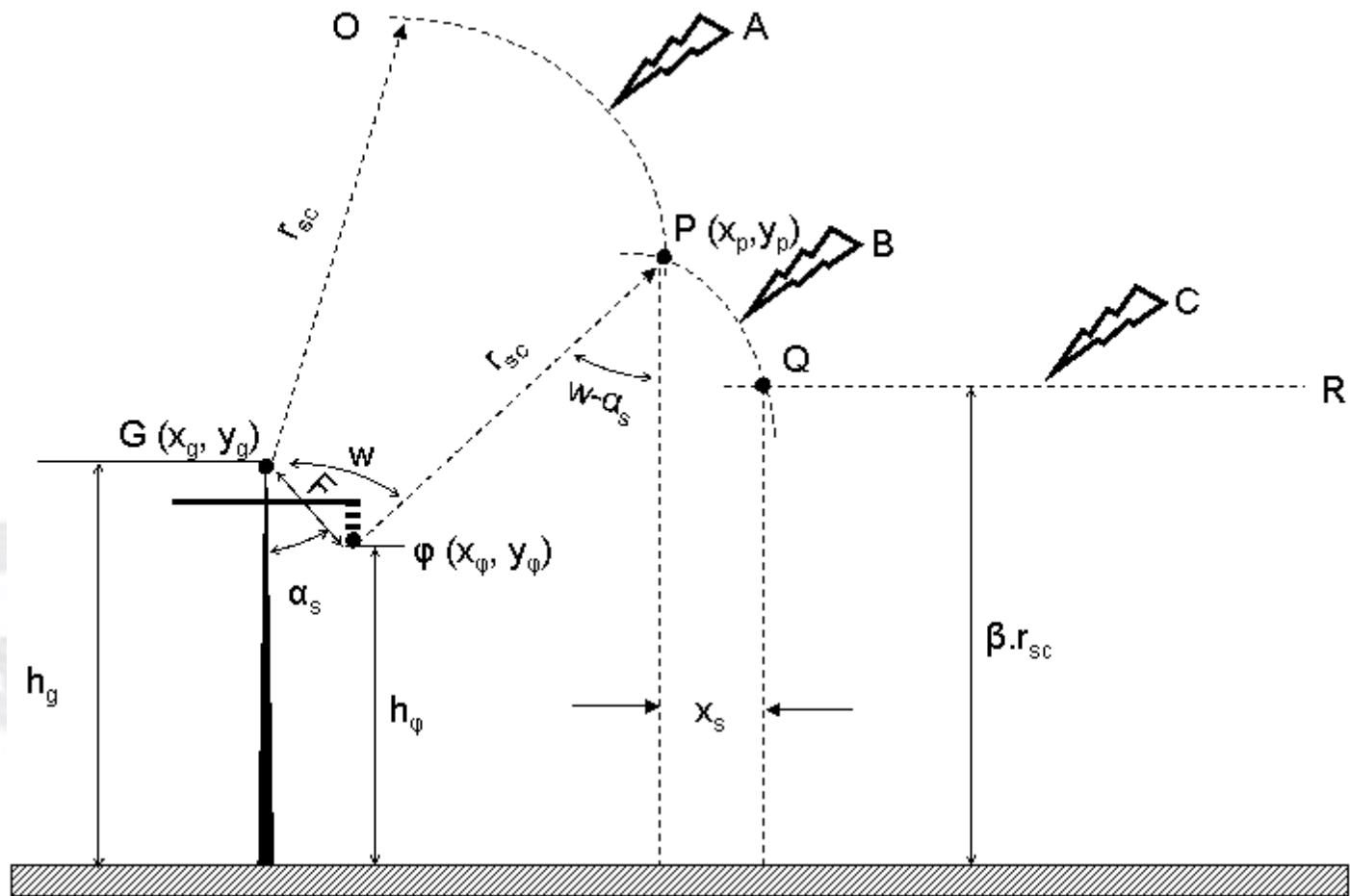
NTC 4552-1, 2008

$$r_{sc} = 10 \cdot (i_{min})^{0,65}$$

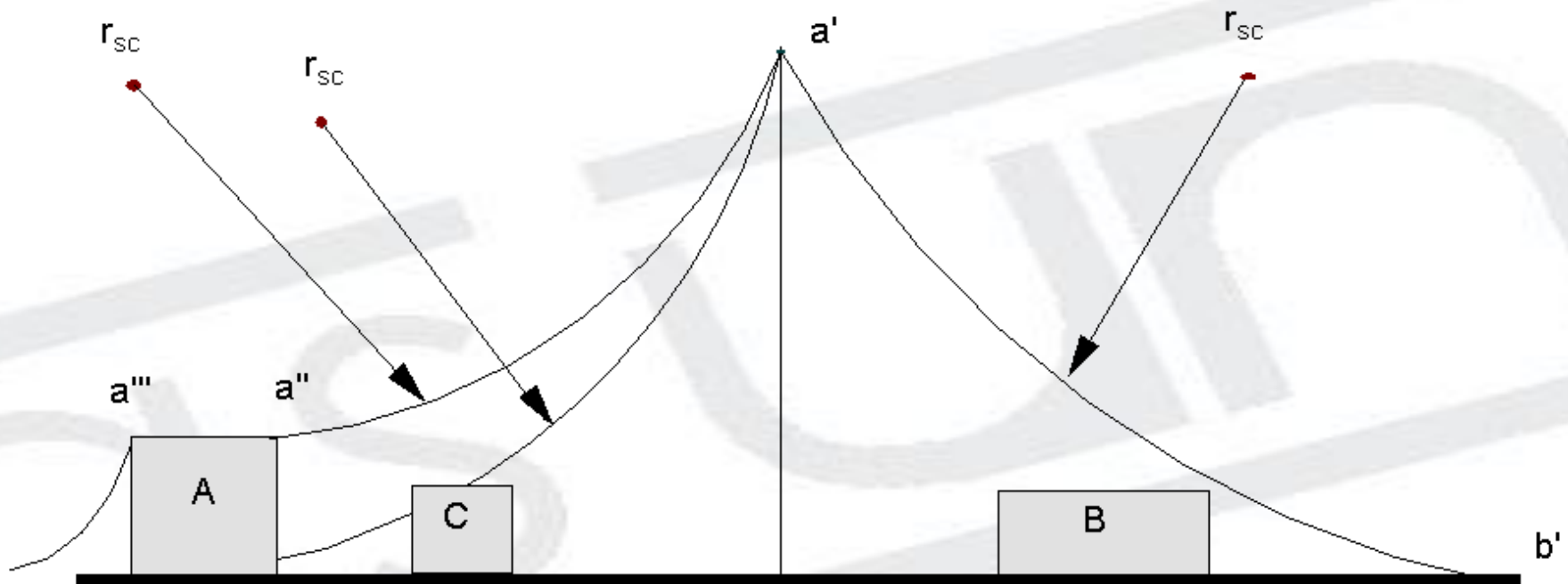
IEC 62305-1, 2006



Modelo electrogeométrico MEG



Modelo Electrogeométrico MEG



Métodos de captación

☐ *Método de la Esfera Rodante – MER*

- ☐ *Se presentan problemas cuando la altura de la estructura supera su radio.*
- ☐ *Es aplicable a estructuras con altura menor a 60 metros.*

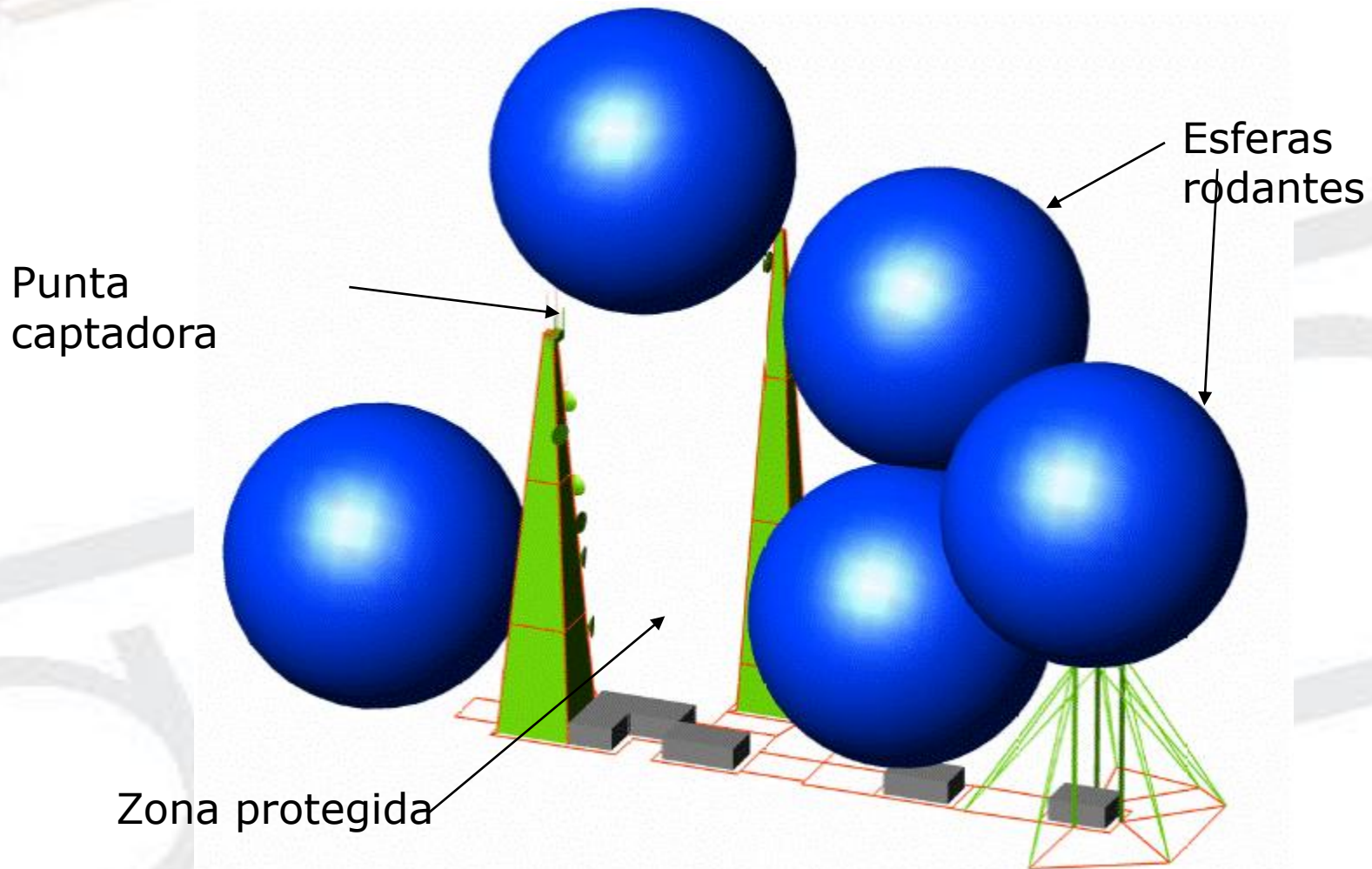
☐ *Método del Ángulo de Protección – MAP*

- ☐ *Existe dificultad al aplicarlo a techos planos.*
- ☐ *Es útil para edificaciones con formas simples pero está limitado a la altura de los mismos y el tamaño del pararrayos.*

☐ *Método del Enmallado – ME*

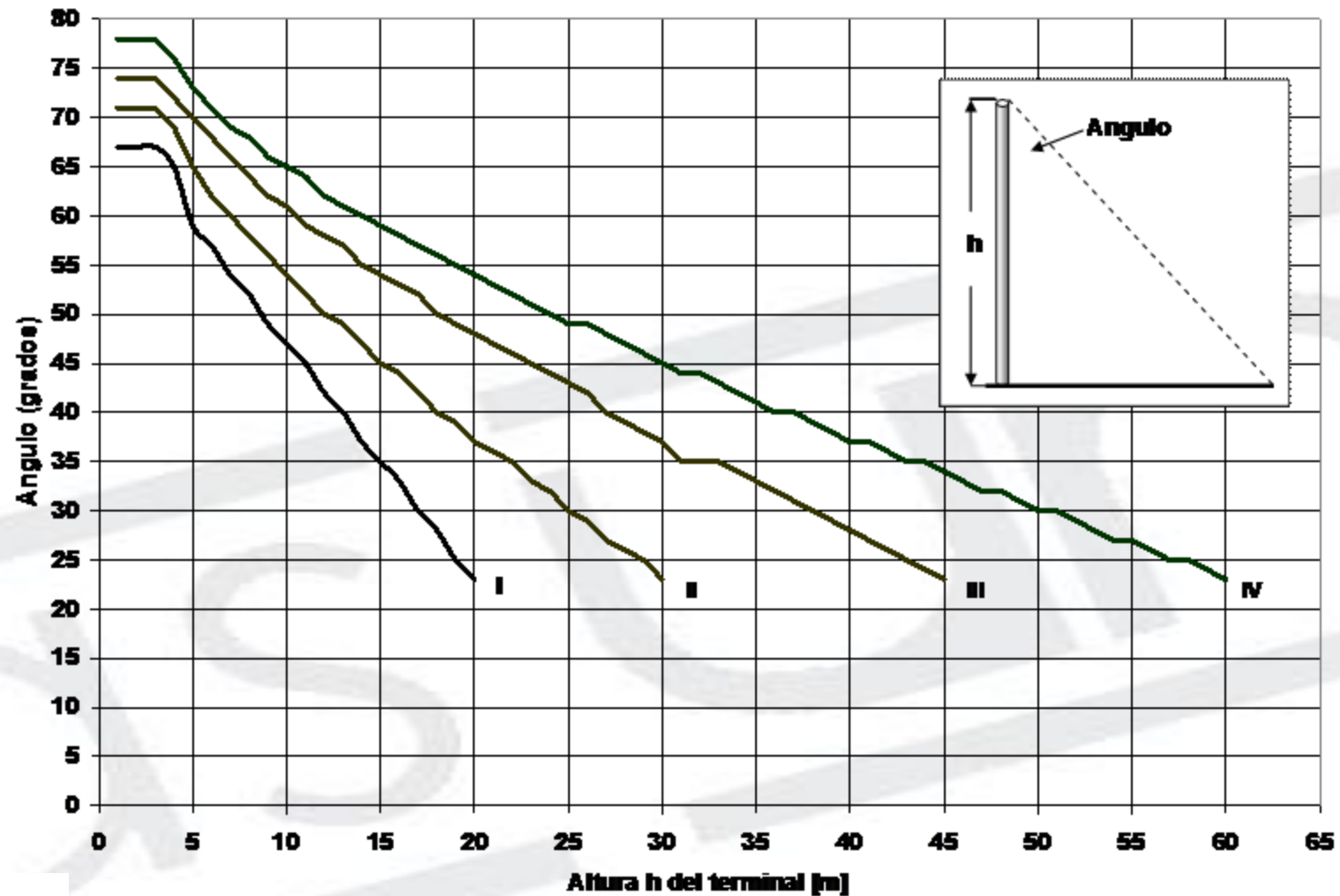
- ☐ *Es útil para proteger superficies planas como techos y terrazas.*

Método MER – Ej. Cerro Kennedy



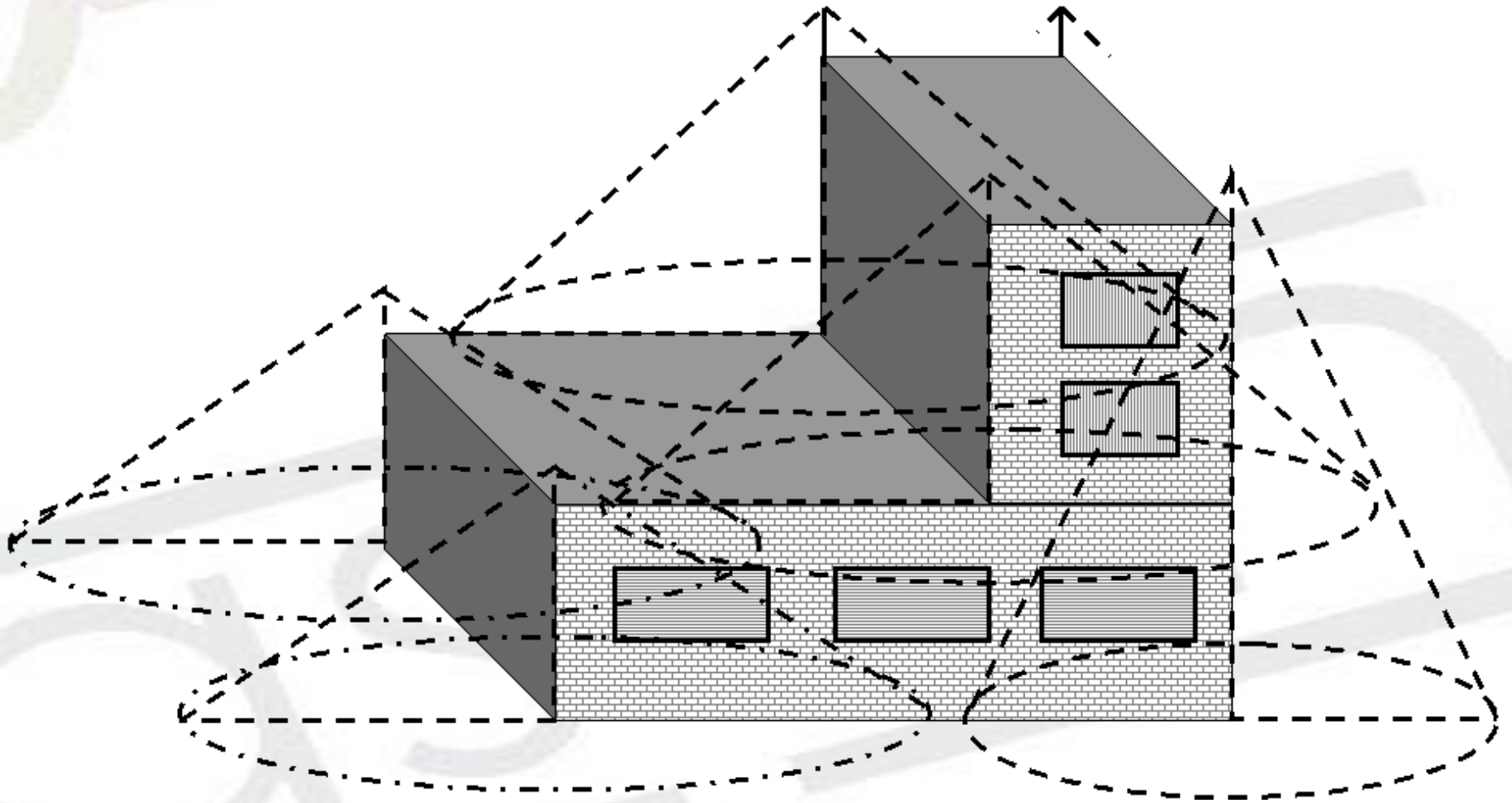
Sistema de captación

Método del Ángulo de Protección - MAP



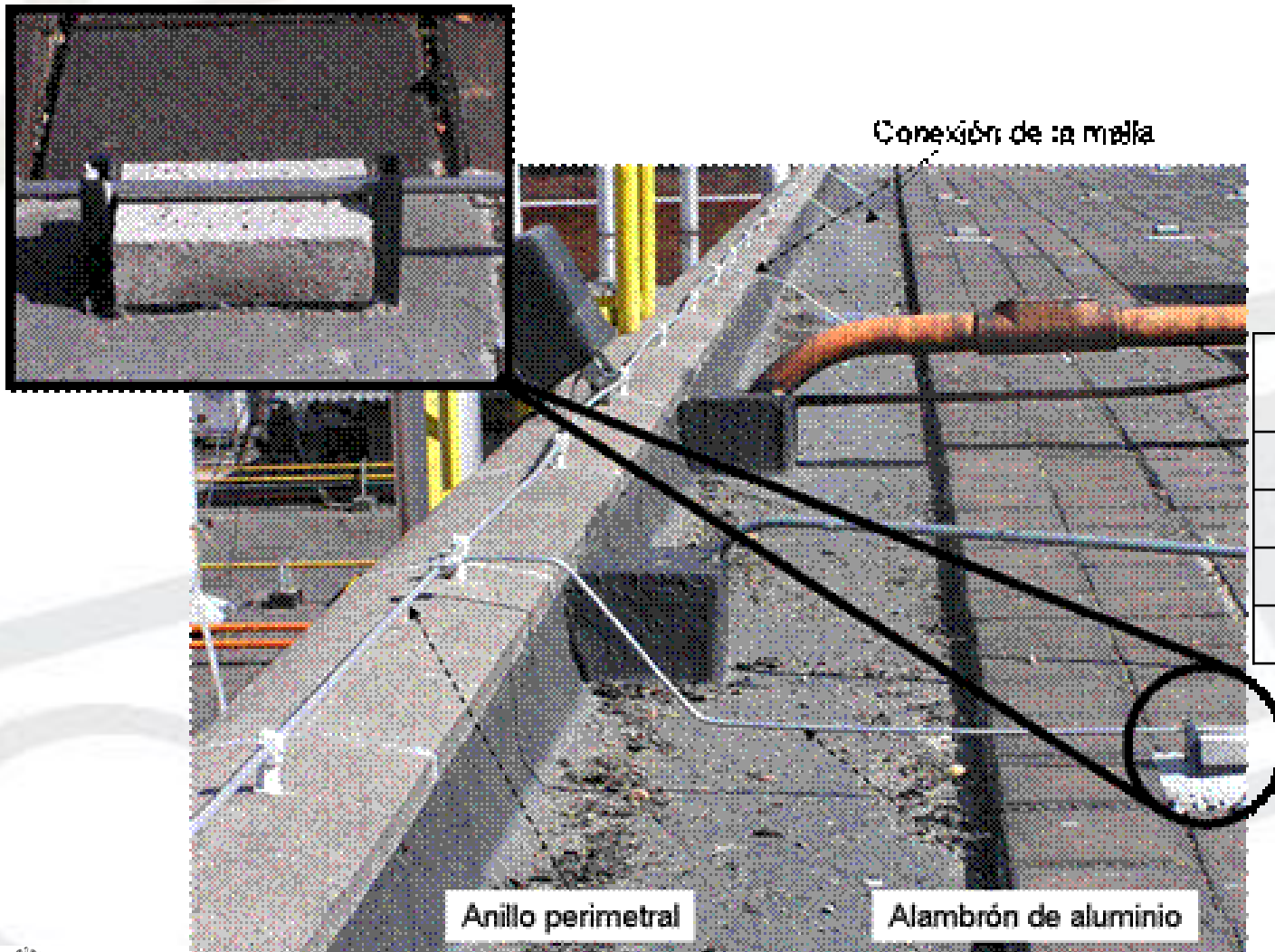
Sistema de captación

MAP – Conos de protección



Sistema de captación

Método del Enmallado



Nivel de Protección	Malla [m]
I	5x5
II	10x10
III	15x15
IV	20x20

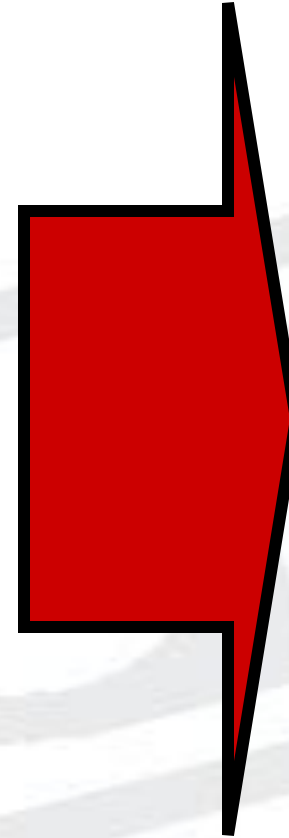
- *No existen sistemas de protección contra rayos 100% eficaces*
- *"Tengo sistema de protección, luego duermo feliz"*
- *En la ciencia no hay verdades absolutas sino certezas temporales: Quedan aun por responder muchas preguntas científicas.*
- *Los "vivos" aprovechan las lagunas del conocimiento.*



St Michael's Cemetery, Toronto
Leon Konigsthal, Jr. Summer 1990

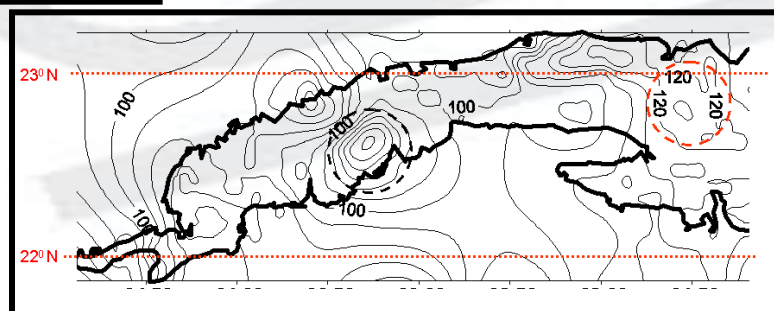
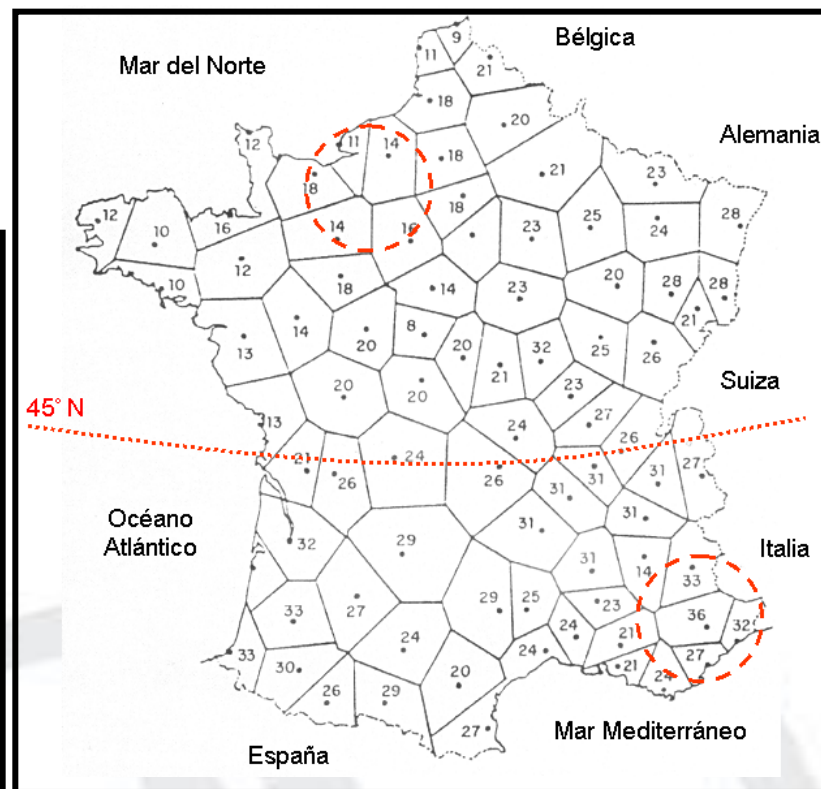
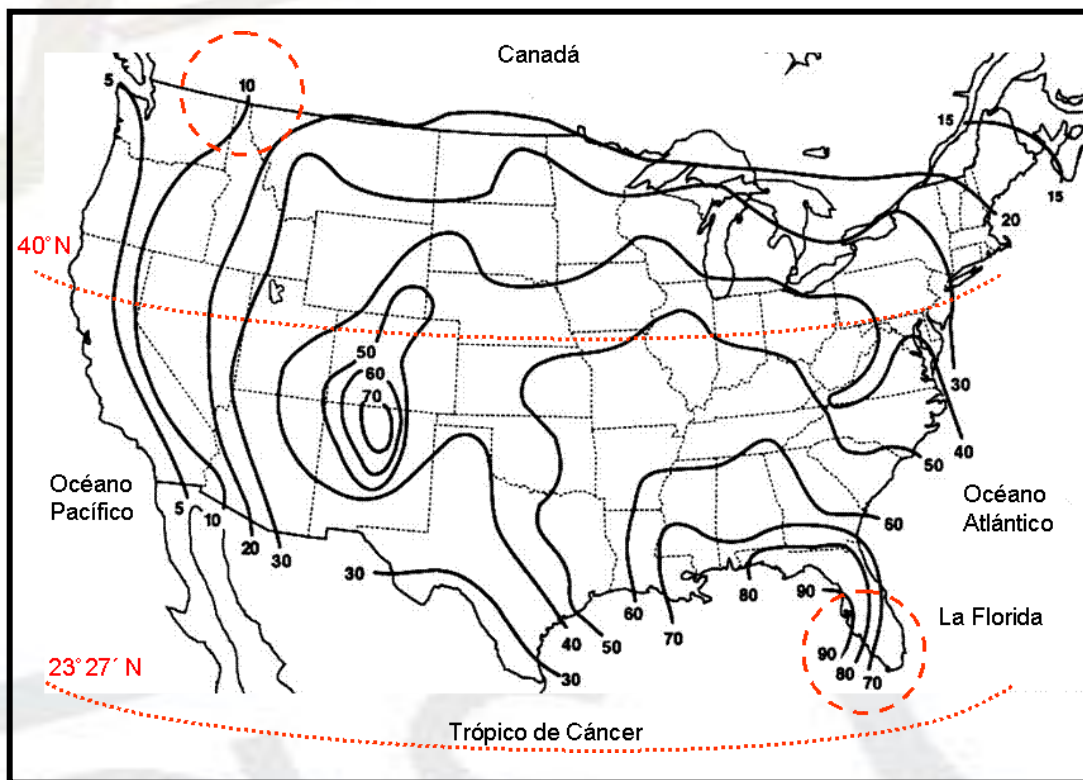
Parámetros del rayo para aplicaciones en ingeniería

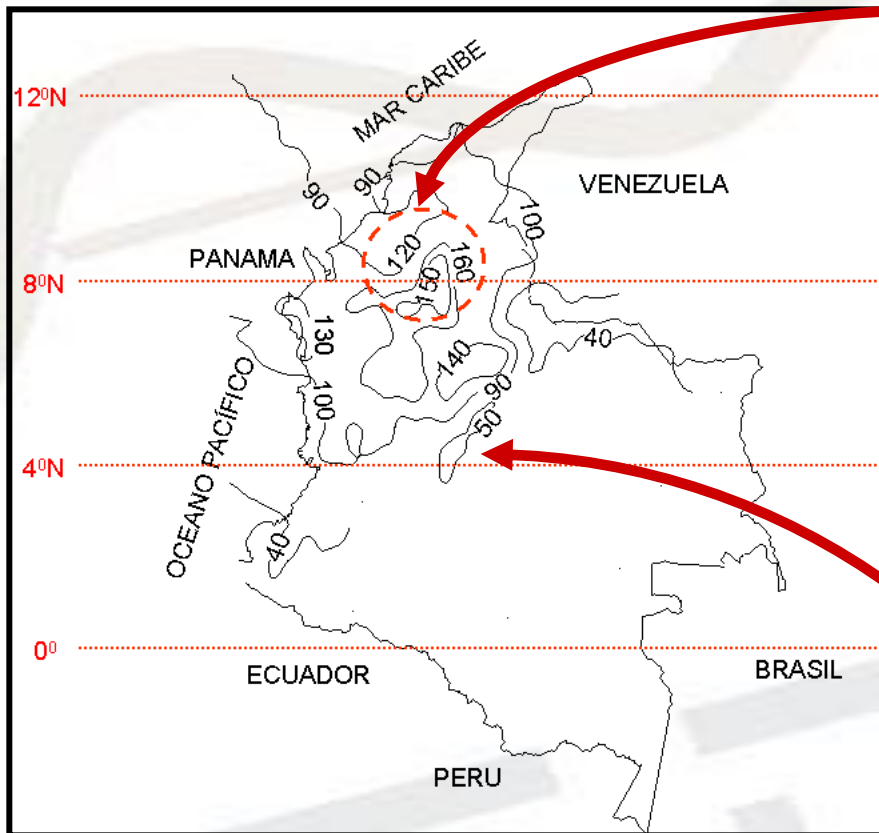
- 1 Nivel Cerámico*
- 2 Densidad de Descargas a Tierra*
- 3 Polaridad*
- 4 Multiplicidad*
- 5 Amplitud de la corriente de Retorno*
- 6 Forma de impulso de la corriente de retorno*



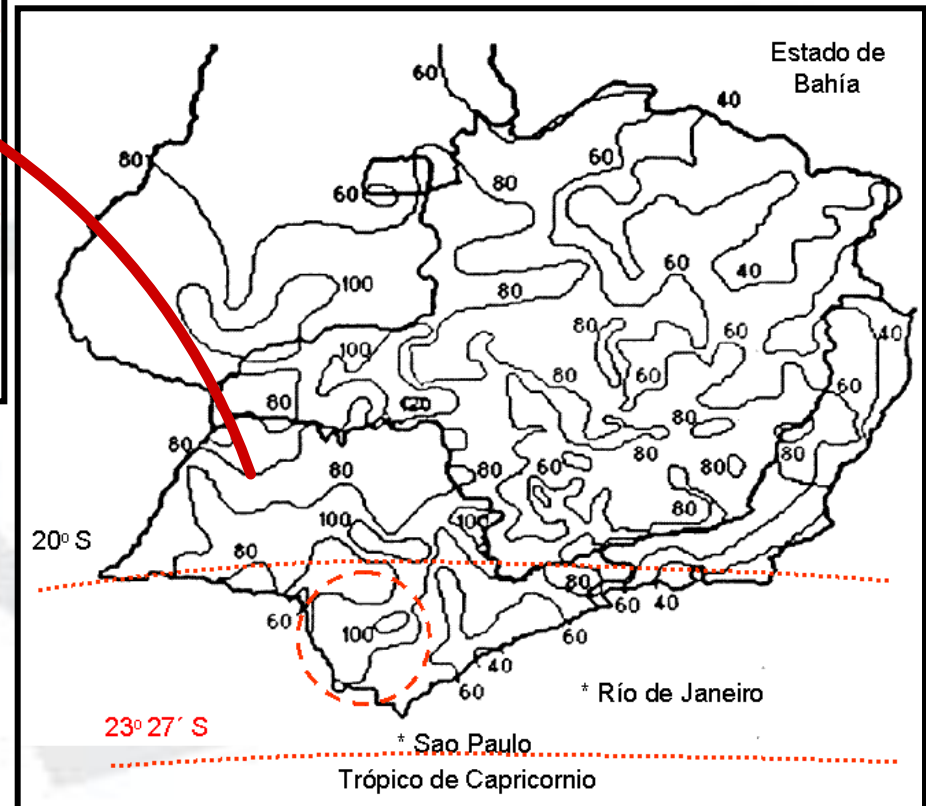
*Espacio y
Tiempo
(CIGRE1999)*

1. Nivel Ceráunico

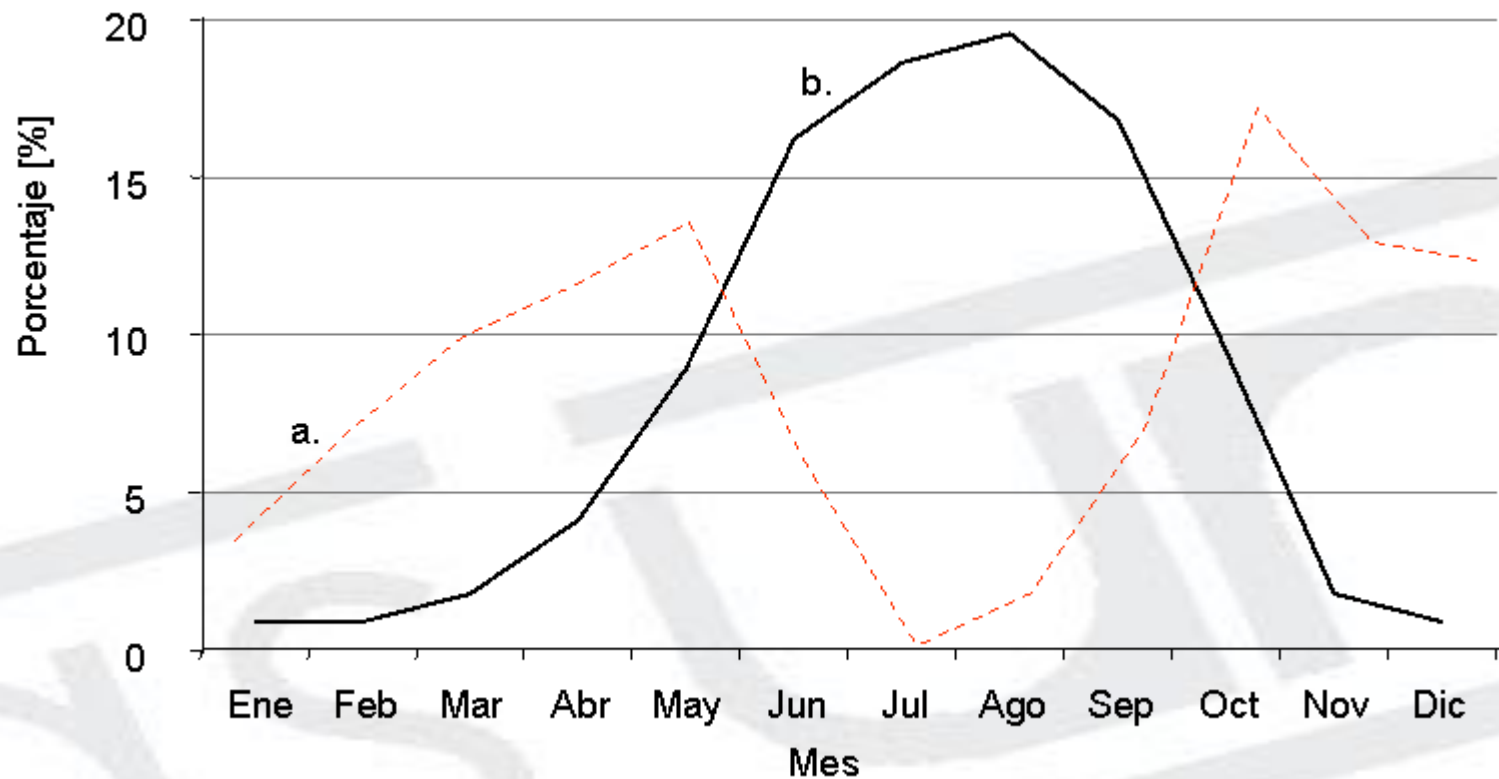




Vientos Alisios

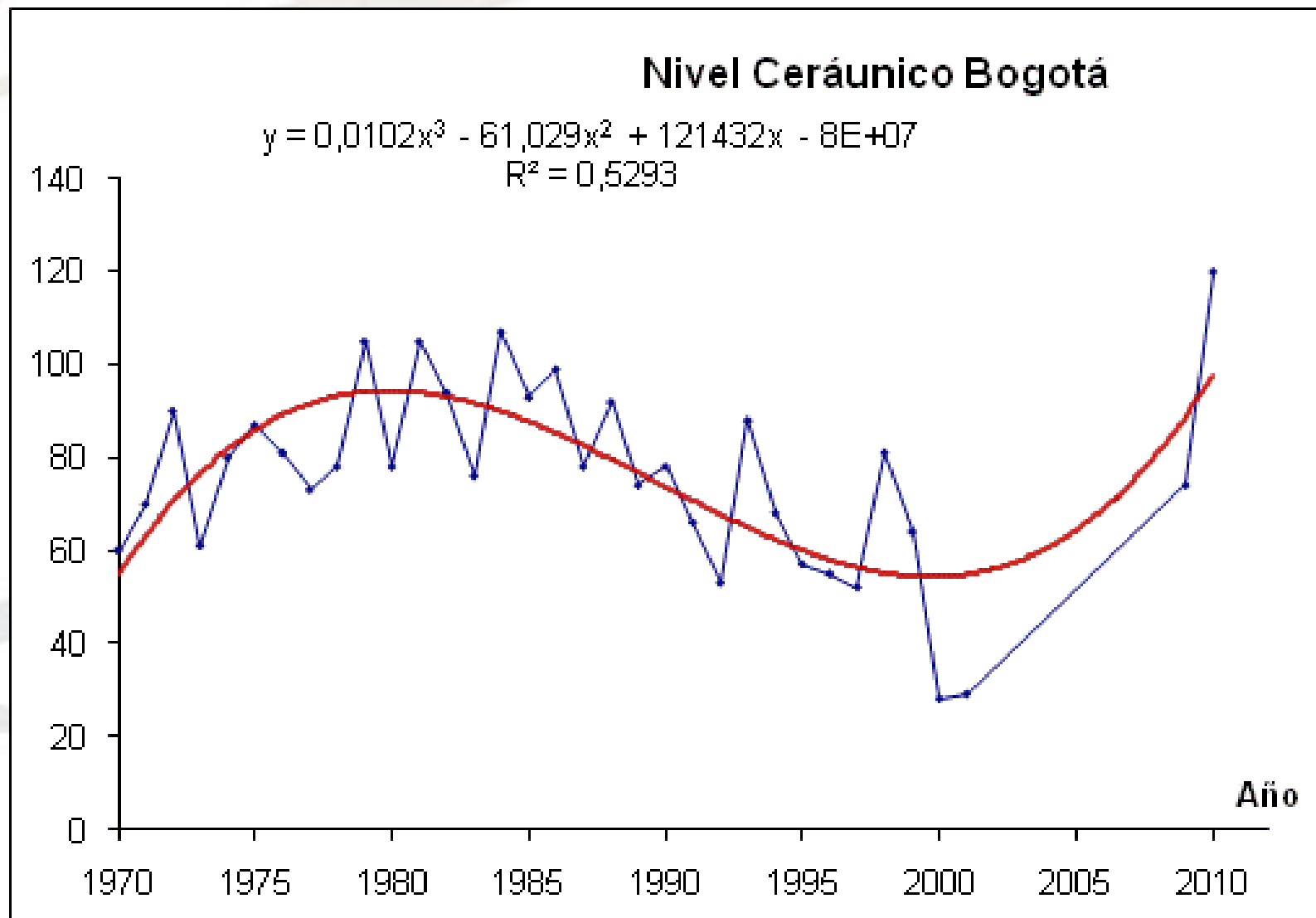


Variación temporal

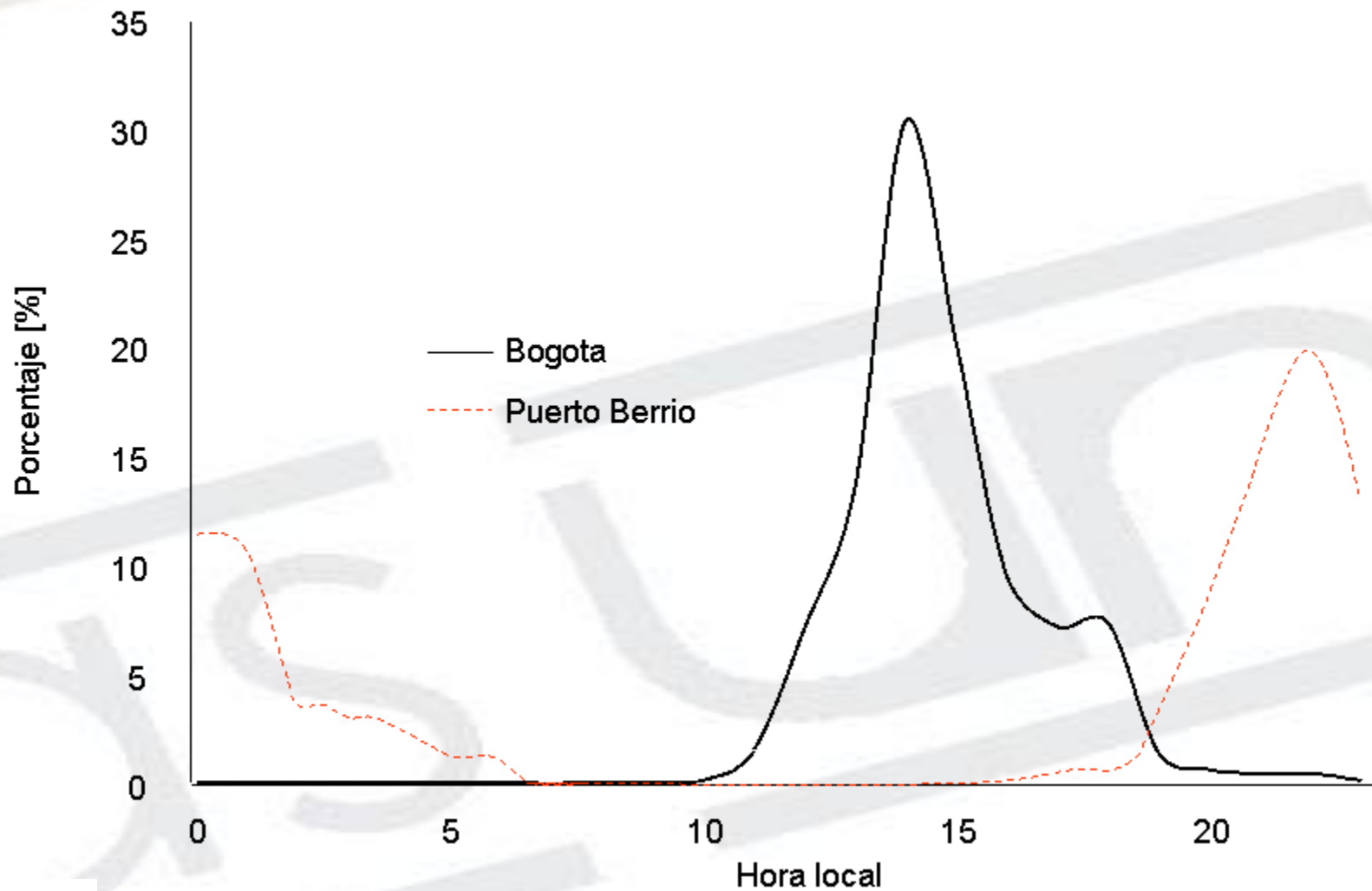


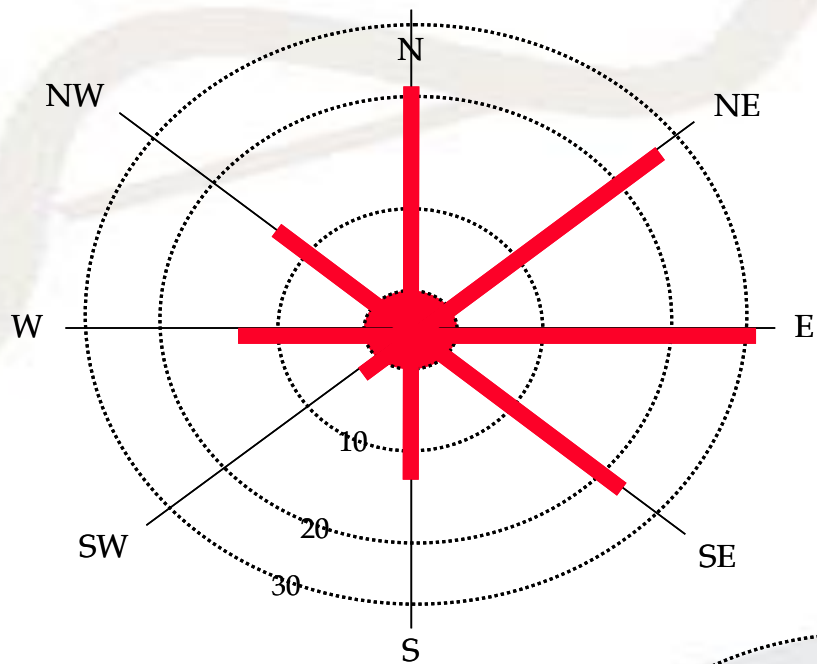
a. Bogotá. b. La Habana

Variación temporal

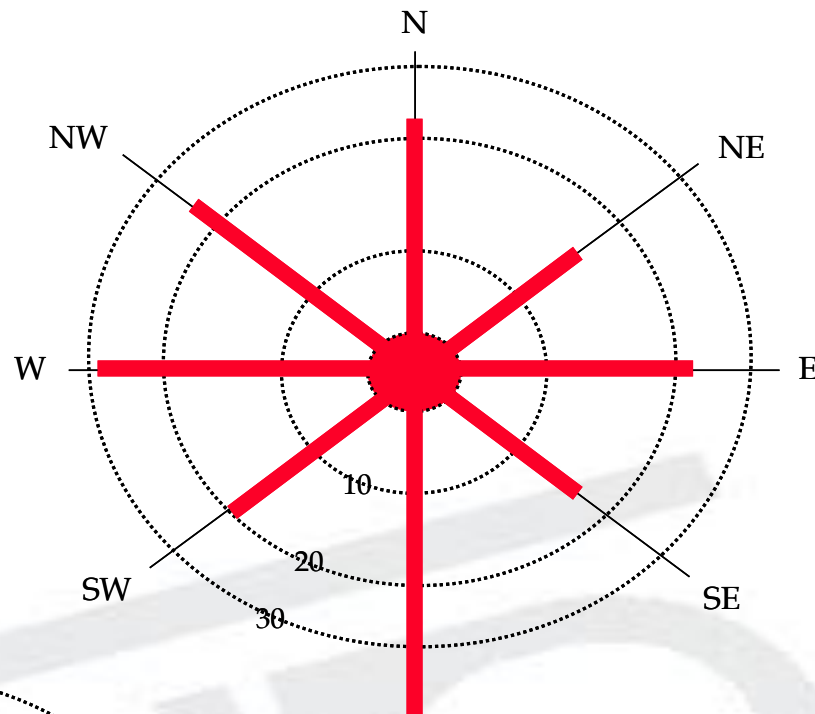


Variación temporal

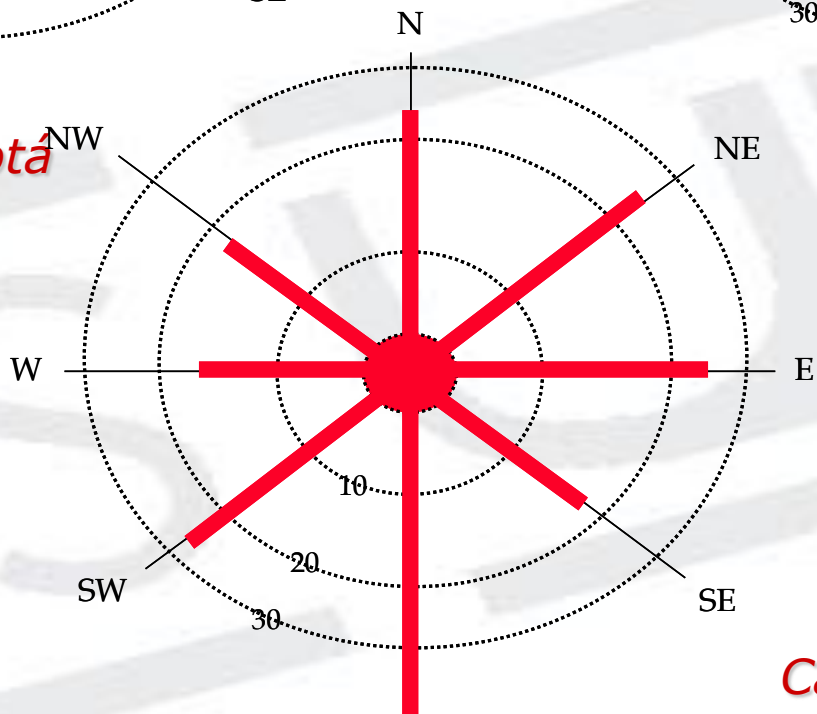




Bogotá



Medellín



Cali

2. Densidad de Descargas a Tierra - DDT

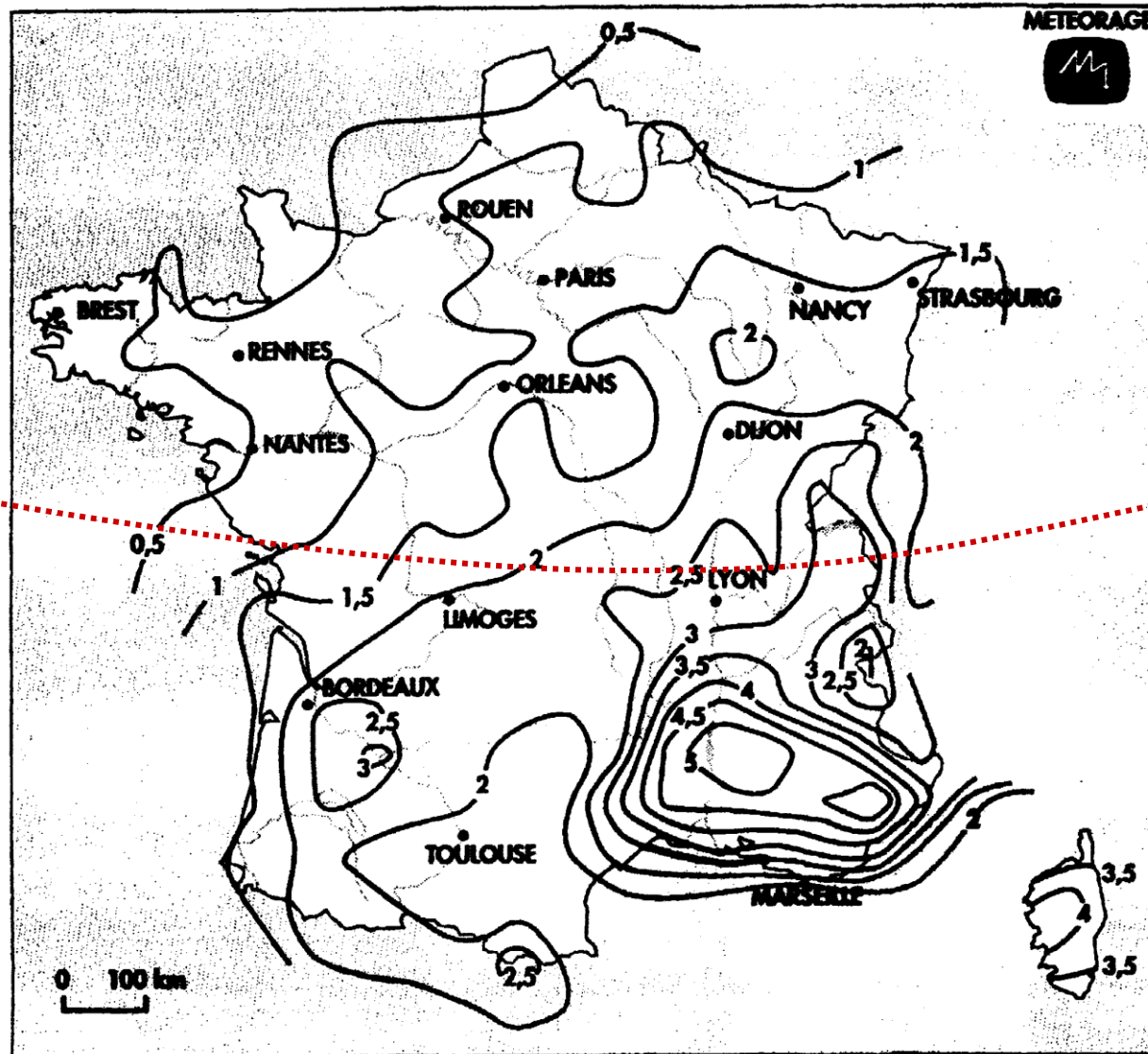
Número de rayos a Tierra por kilómetro cuadrado - año

Determinado por:

- ☐ *Mediciones directas*
- ☐ *Ecuaciones empíricas*

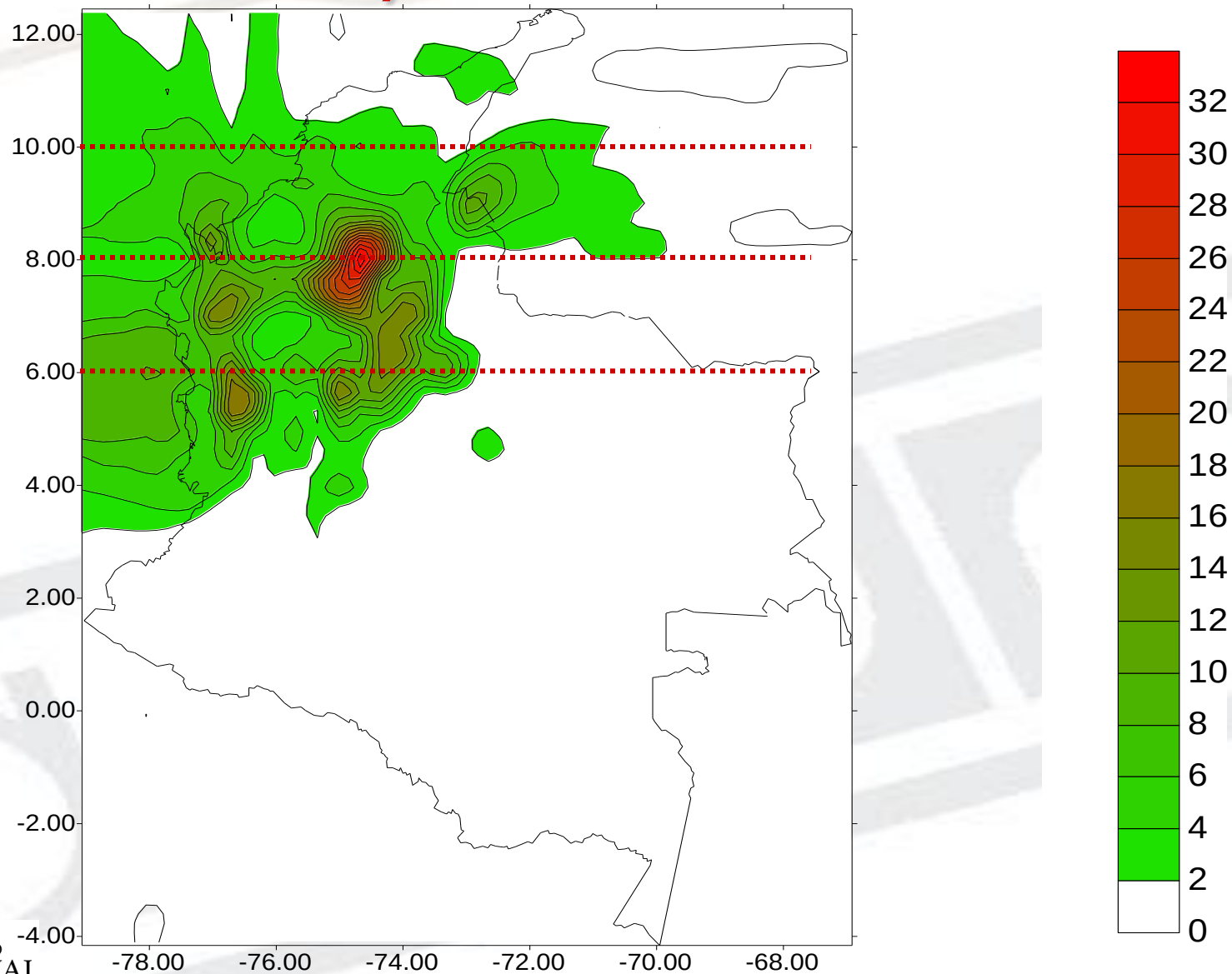
DDT Francia

45° N

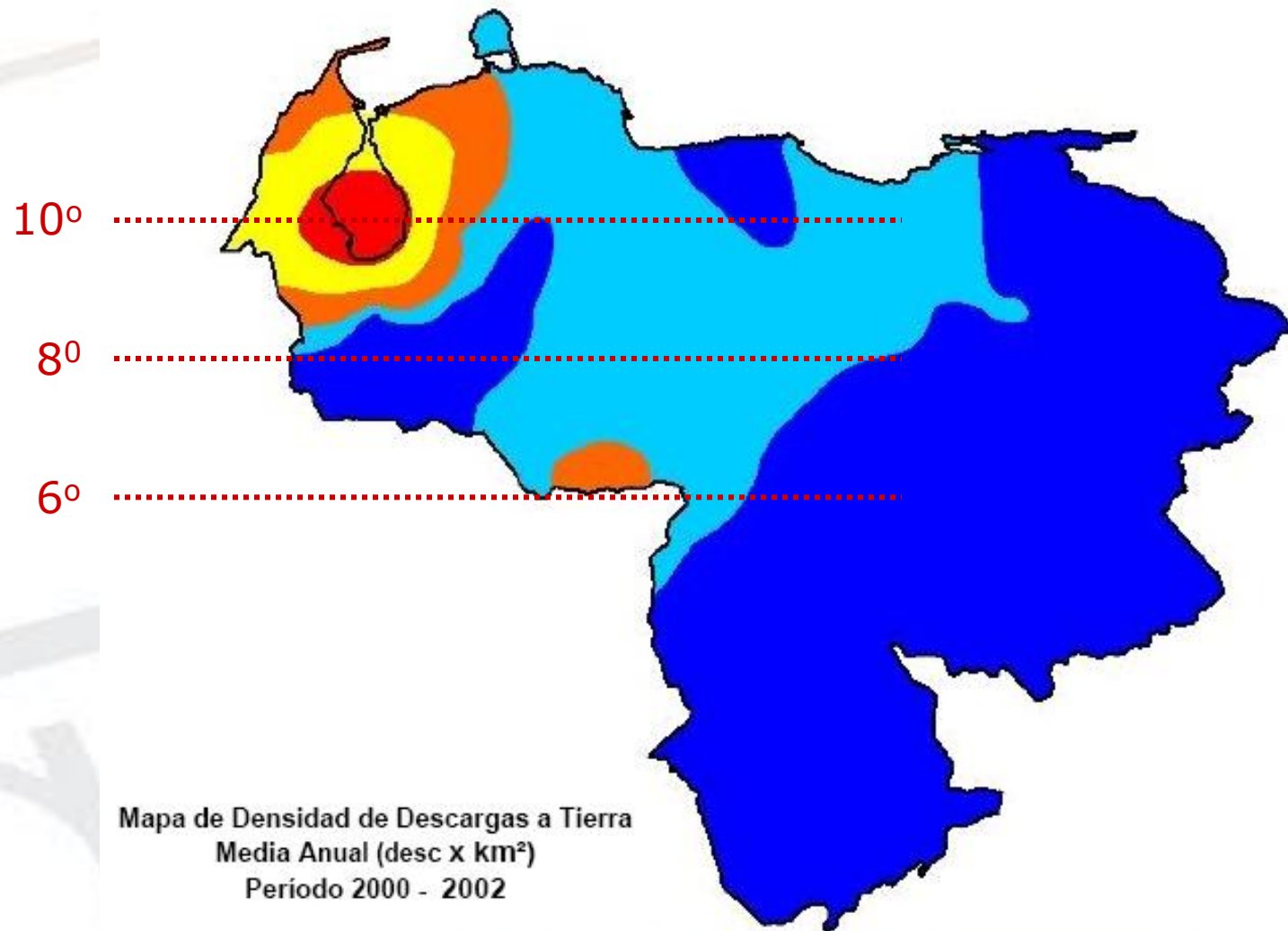


Pour connaître la densité de foudroiement sur l'une des 36000 communes de France : 3617 METEORAGE.

Densidad rayos a tierra - Colombia



Densidad rayos a tierra - Venezuela



Mapa de Densidad de Descargas a Tierra
Media Anual (desc x km²)
Periodo 2000 - 2002



10 zonas con más alta densidad (rayos/km²-año) en el mundo¹

1.- Kamembe	Ruanda	82,7
2.- Boende	R. Dem. del Congo	66,3
3.- Lusambo	R. Dem. del Congo	52,1
4.- Kananga	R. Dem. del Congo	50,3
5.- Kuala Lumpur	Malasia	48,3
6.- Calabar	Nigeria	47,4
7.- Franceville	Gabon	47,1
8.- Posadas	Argentina	42,7
9.- Ocaña	Colombia	39,9
10.- Concepción	Paraguay	37,0

¹ Christian, H. J., R. J. Blakeslee, and S. J. Goodman, The detection of lightning from geostationary orbit, J. Geophys. Res. 2004

Ecuaciones de DDT en función de NC

Ecuación Propuesta	Autor	DDT, NC=57 (1995)	DDT, NC=68 (1994)	DDT, NC=88 (1993)
DDT medido en Bogotá	-	0.6	1.2	2.4
$0.053*(NC)^{1.17}$	Eriksson, Africa	6	7.4	10
$0.04*(NC)^{1.25}$	Eriksson, IEEE	6.3	7.8	10.8
$0.15*(NC)$	Brown, USA	8.6	10.2	13.2
$0.1*(NC)$	Aiya, India, IEC	5.7	6.8	8.8
$0.14*(NC)$	Anderson	8	9.5	12.3
$0.17*(NC)$	Horn, U.S.A	9.7	11.6	15
$0.0017.NC^{1.56}$	Torres, Colombia	0.93	1.22	1.83

Correlación DDT y NC

$$\text{DDT} = 0.024 \cdot \text{NC}^{1.12} \quad \text{México}$$

$$\text{DDT} = 0,030 \cdot \text{NC}^{1,12} \quad \text{Brazil}$$

$$\text{DDT} = 0,0017 \cdot \text{NC}^{1,56} \quad \text{Colombia}$$

Proposal IEEE 1410

IEC 62305-2

"NOTE- If the map of N_g is not available, it may be estimated in several ways:

The GFD **for temperate regions** may be estimated from the keraunic level using equation:

$$N_g = 0.04 * T_d^{1.25} \quad (\text{IEEE})$$

$$N_g = 0,1 T_d \quad (\text{IEC})$$

In the case of **tropical regions**, the GFD may be estimated from the keraunic level using the results found in mountainous regions of Mexico, Brazil and Colombia as follows:

$$N_g = 0.024 \times T_d^{1,12} \quad \text{México}$$

$$N_g = 0,030.T_d^{1,12} \quad \text{Brazil}$$

$$N_g = 0,0017.T_d^{1,56} \quad \text{Colombia}$$

Where

T_d is the number of thunderstorm days per year (the keraunic level)"

3. Amplitud de la corriente de retorno del rayo

- ☐ *La amplitud de la corriente de retorno de la descarga eléctrica atmosférica es frecuentemente referida como **el parámetro más importante para aplicaciones en ingeniería.***

Determinado por:

- ☐ *Modelos matemáticos*
- ☐ *Mediciones directas*

Valor pico corriente de retorno del rayo en diferentes zonas del planeta (Adaptado de Lee et. al. 1979)

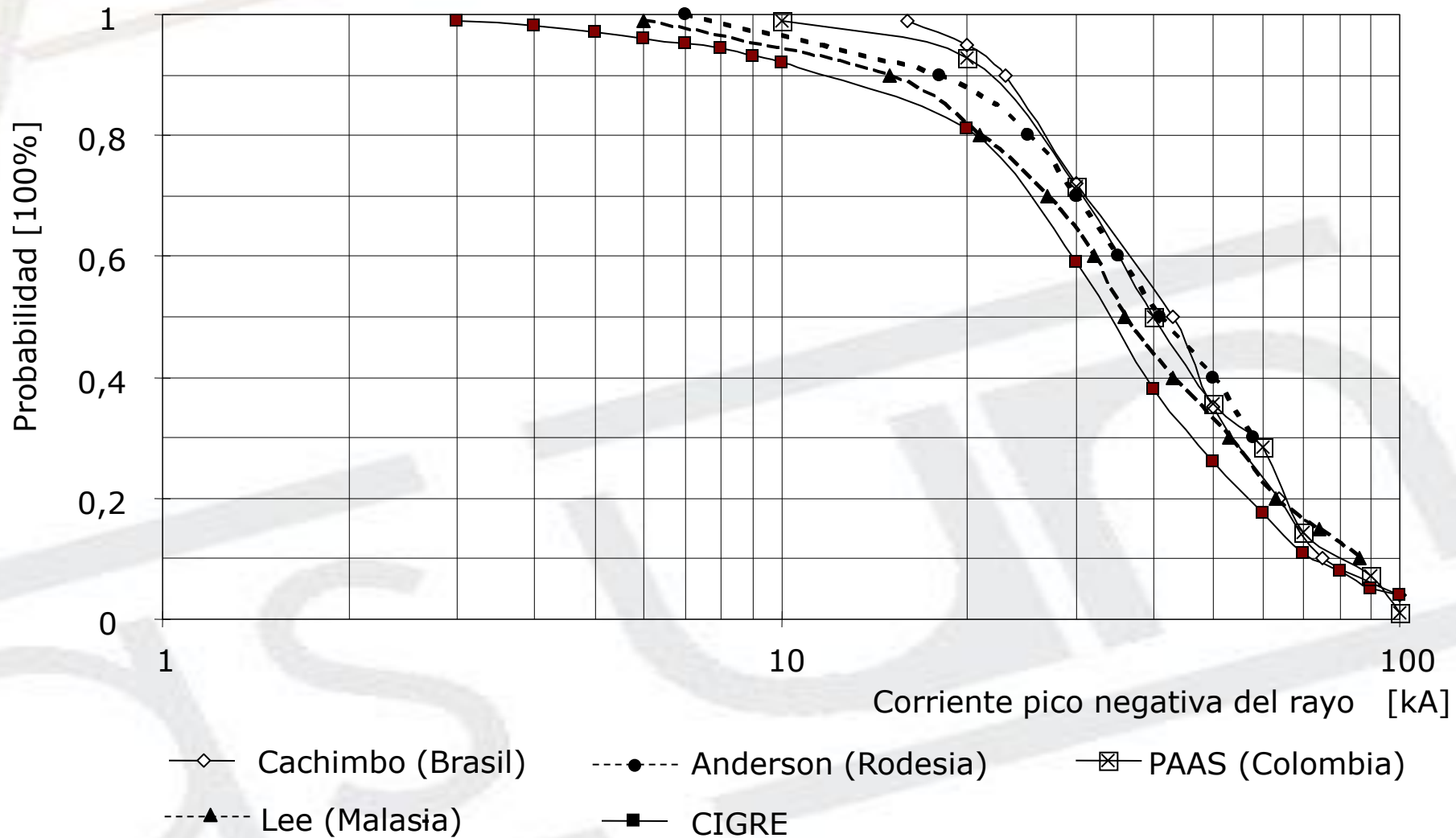
<i>País</i>	<i>Mediana (kA)</i>
<i>Estados Unidos</i>	<i>23</i>
<i>Suiza</i>	<i>30</i>
<i>Suecia</i>	<i>30</i>
<i>Polonia</i>	<i>31</i>
<i>Malasia</i>	<i>36</i>
<i>Brasil¹</i>	<i>43</i>
<i>Rodesia</i>	<i>42</i>
<i>Colombia²</i>	<i>43</i>

¹ Monte Cachimbo, Minas Gerais, Brasil 2004

² Mediciones de campo eléctrico a menos de 100 km. y aplicando el modelo MTL. Torres, H. "El Rayo", Editorial UNIBIBLOS, Bogotá, 2002.



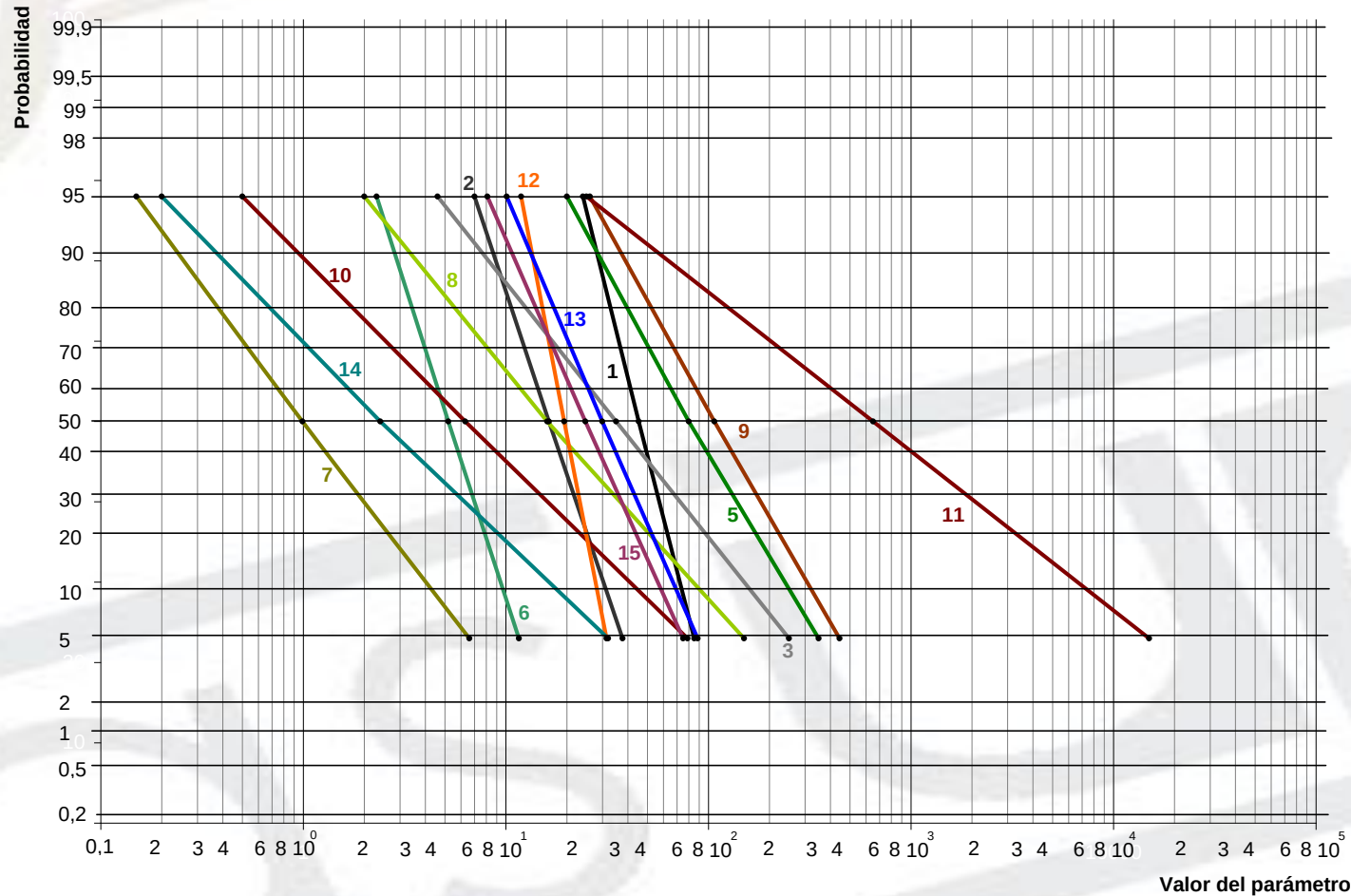
Corriente de rayo



Corriente pico de la primera descarga de retorno negativa

<i>Zona</i>	<i>Media</i>	<i>δ_{In}</i>
<i>Templada</i>	<i>31.1</i>	<i>0.48</i>
<i>Tropical</i>	<i>45.3</i>	<i>0.39</i>

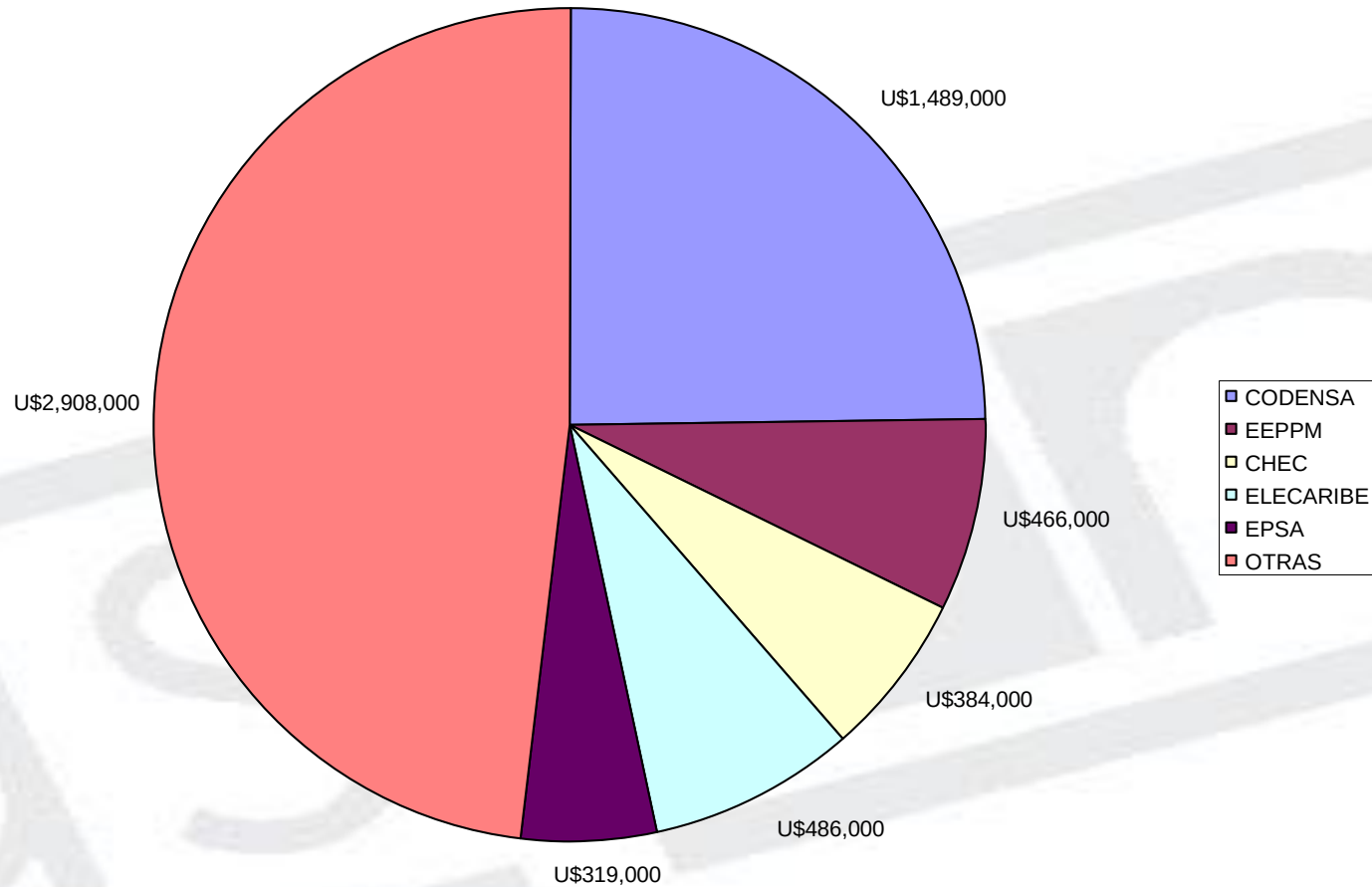
Parámetros del rayo, zona tropical



1. $I (1^a -)$
2. $I (\text{Sub} -)$
3. $I (1^a +)$
4. $Q (-)$
5. $Q (+)$
6. $Q (1^a -)$
7. $Q (\text{Sub} -)$
8. $Q (1^a +)$
9. $W/R (1^a -)$
10. $W/R (\text{Sub} -)$
11. $W/R (1^a +)$
12. $di/dt (1^a -)$
13. $di/dt (\text{Sub} -)$
14. $di/dt (1^a +)$
15. $di/dt 30-90\% (\text{Sub} -)$

2. Metodología Integral:

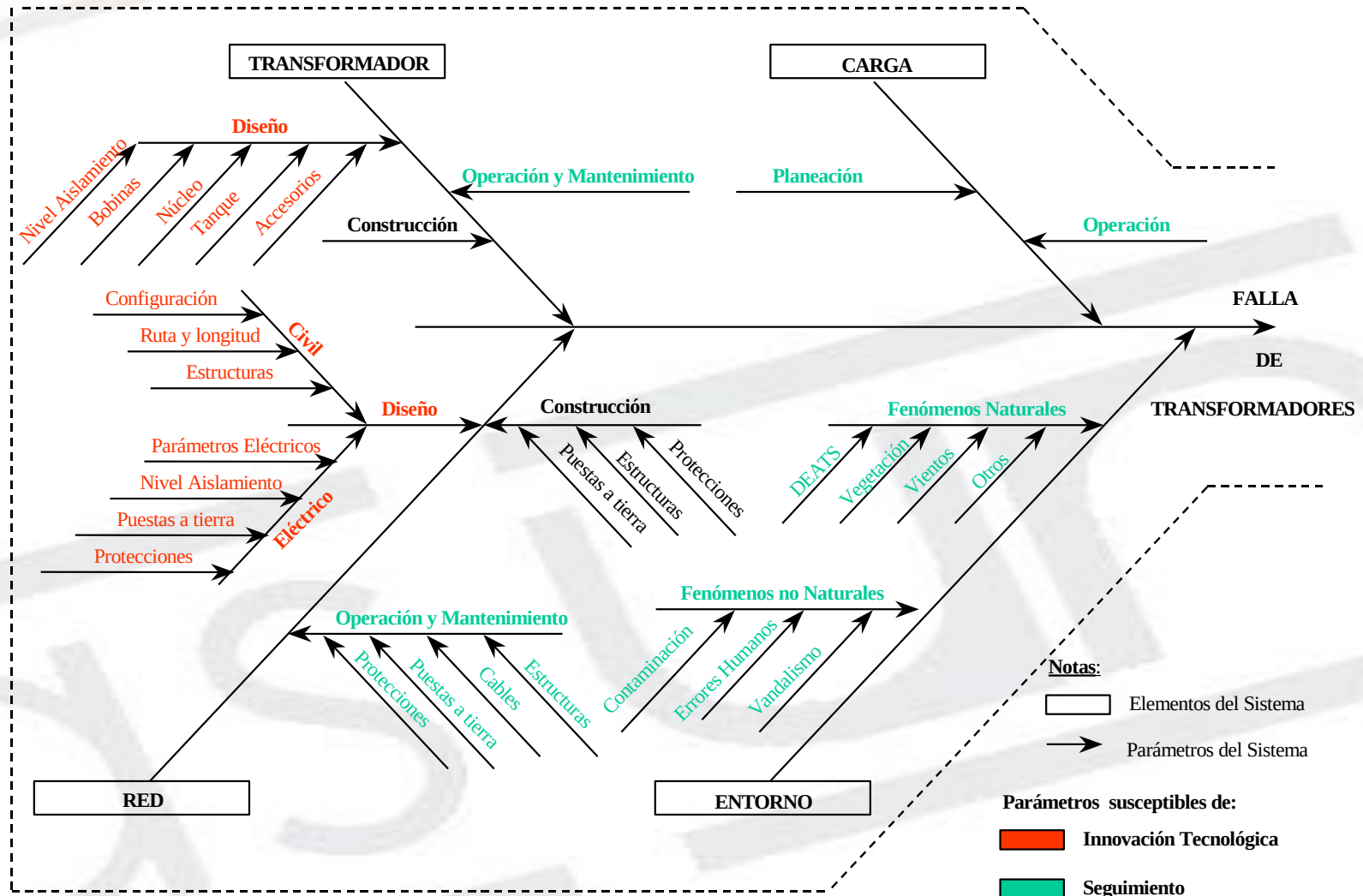
Costo Anual de Reposición de Transformadores de distribución Fallados en Colombia



Metodología de los 3 elementos integrales

- 1. Diagnóstico Integral del problema (DI)*
- 2. Alternativas tecnológicas, Diseño e Implementación Integral de una solución (ATS)*
- 3. Control y monitoreo de variables (CM)*

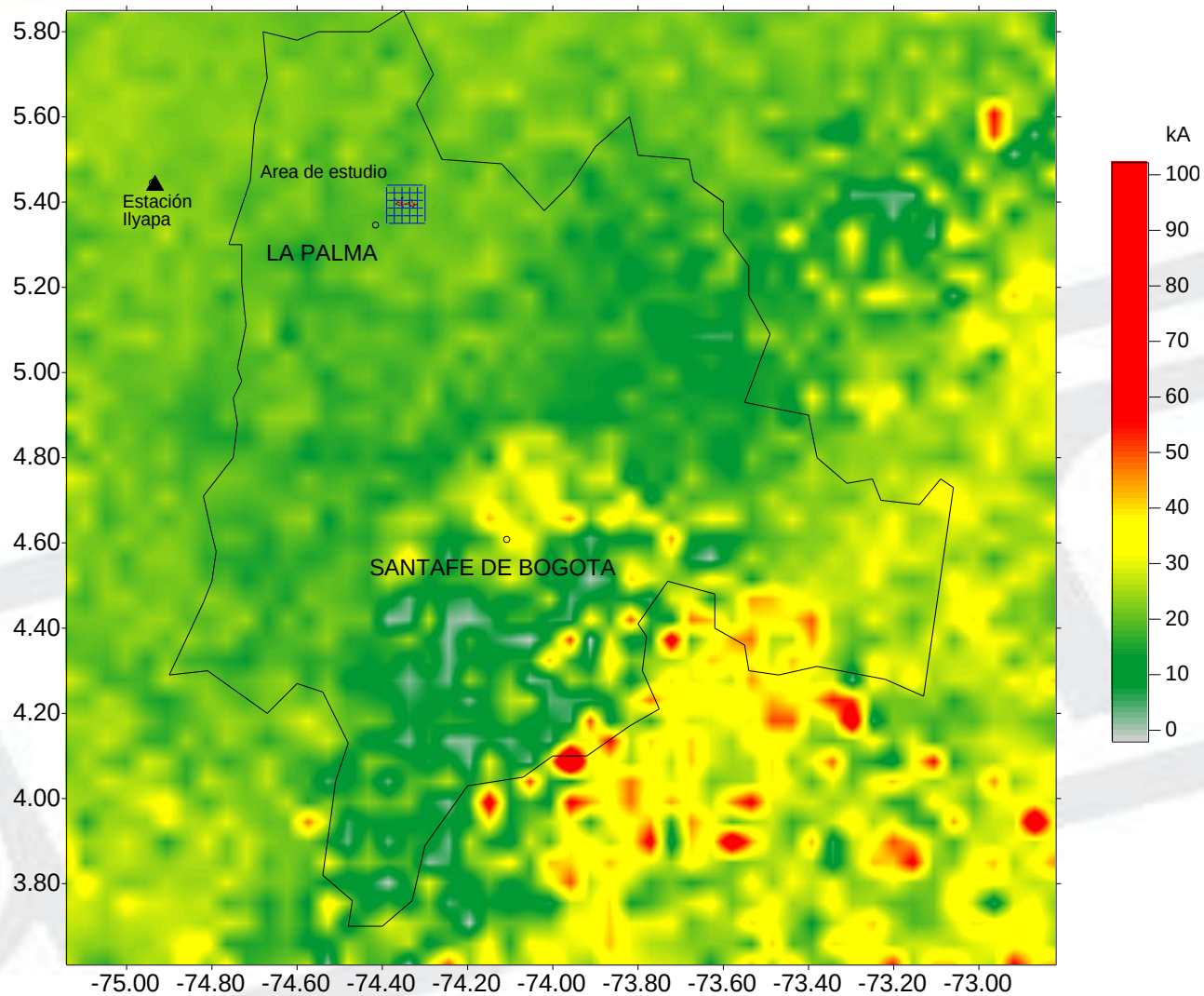
Diagrama Causa – Efecto (DI, ATS)



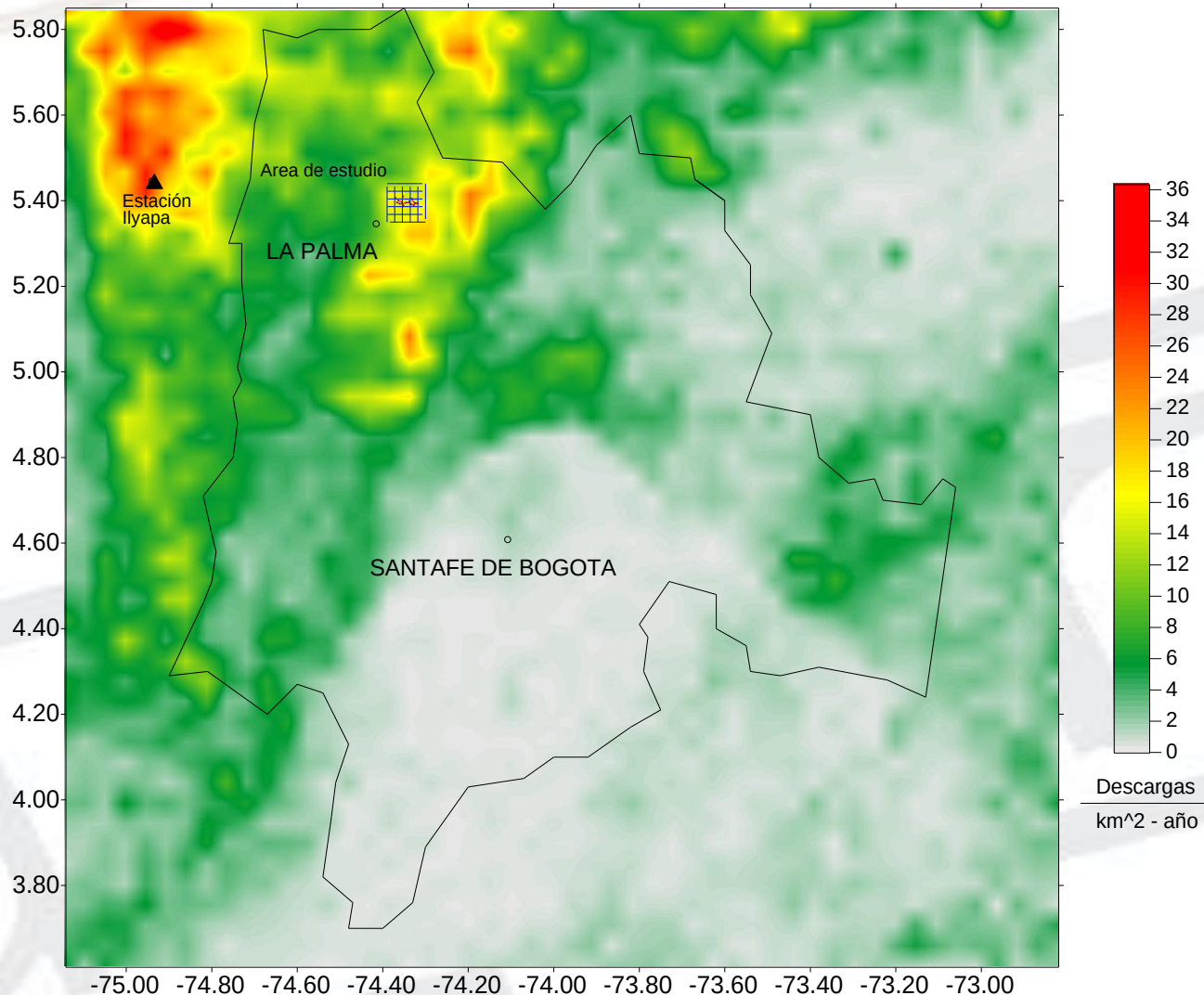
La Norma NTC4552-2004 _(DI)

$$\text{Riesgo} = 0,7 * R_{DDT} + 0,3 * R_{labs}$$

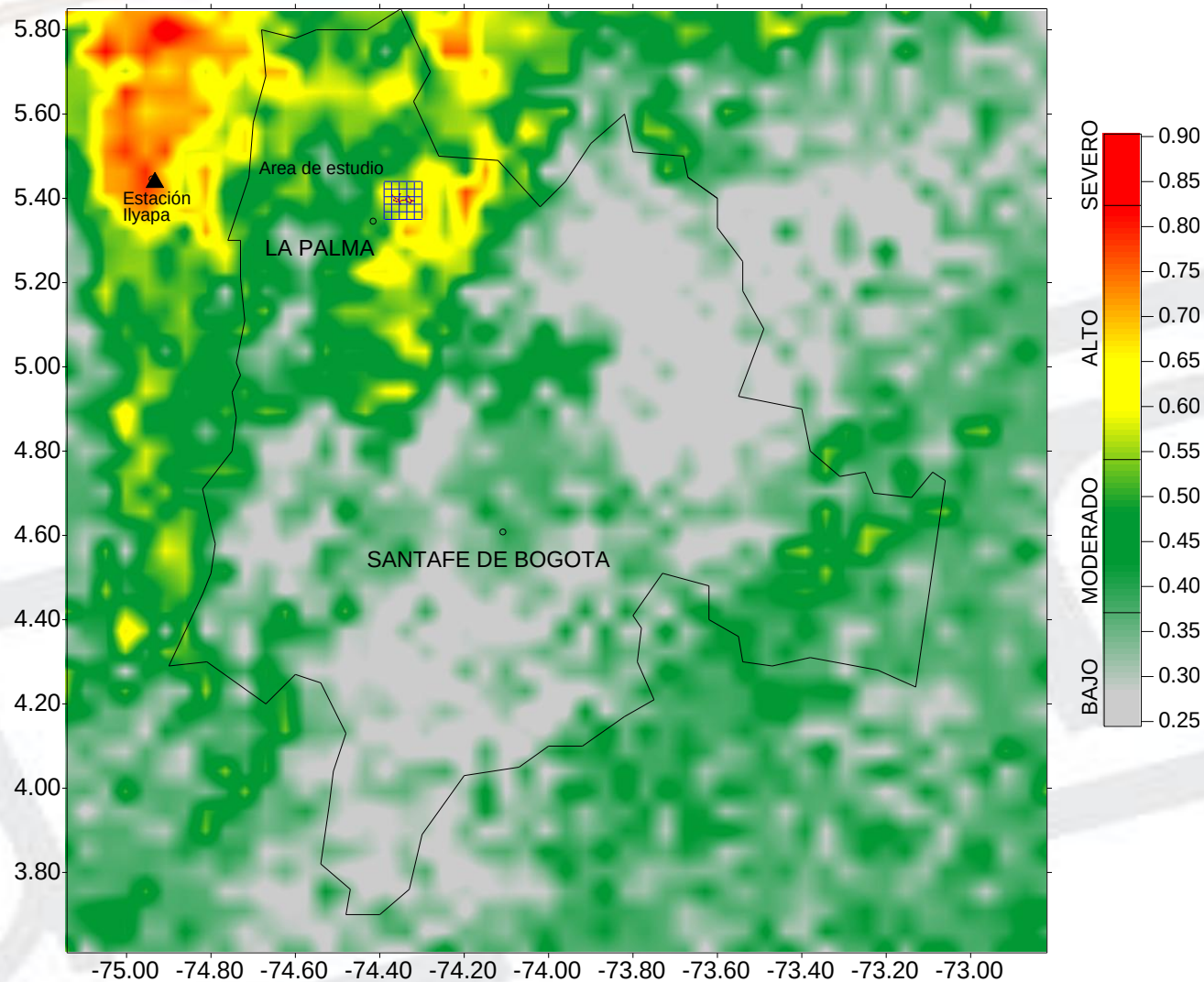
Corriente Absoluta Promedio (DI)



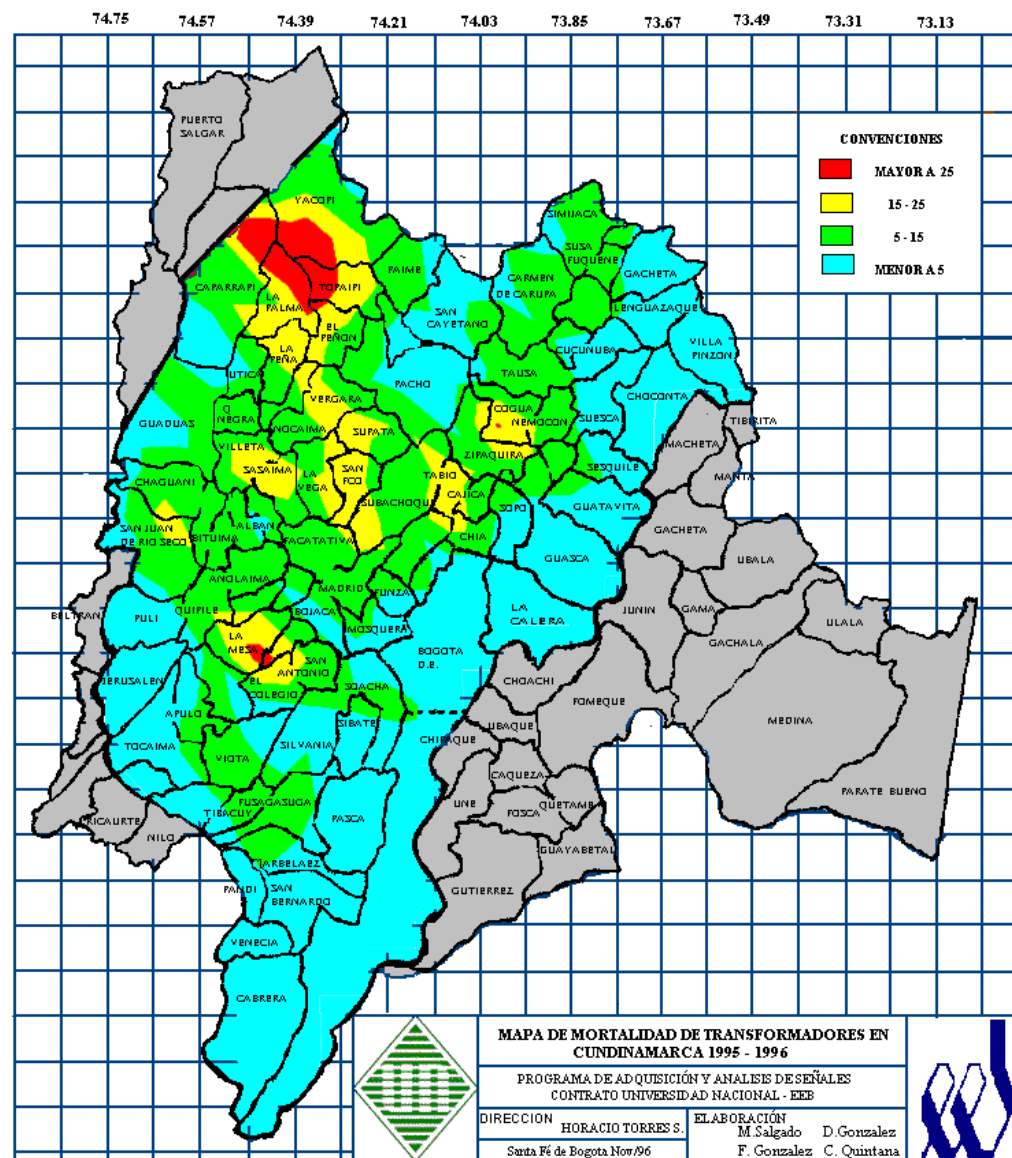
Densidad de Descargas a Tierra (DI)



Indice de Riesgo por Rayos (DI)

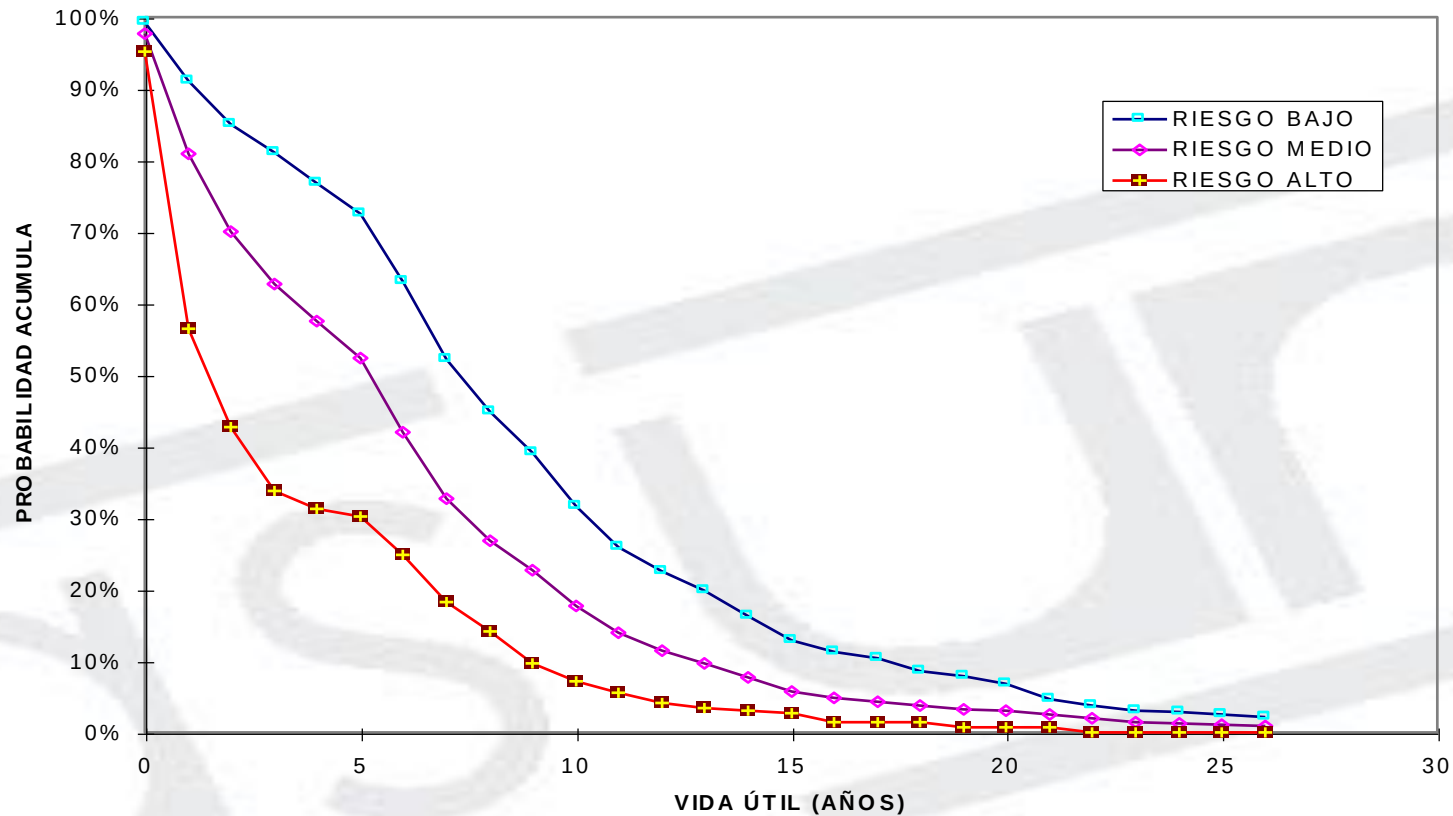


Mortalidad de Transformadores (DI)



Índice de Vida Útil _(DI)

PROBABILIDAD ACUMULADA DE VIDA ÚTIL PARA LOS TRANSFORMADORES FALLADOS
EN EL SISTEMA RURAL EEB PARA TRES NIVELES DE RIESGO POR RAYOS (ENE/94 -
JUN/96)



Manipulación del Trafo Tipo Estándar (DI)



Manipulación del Trafo Tipo Estándar (DI)



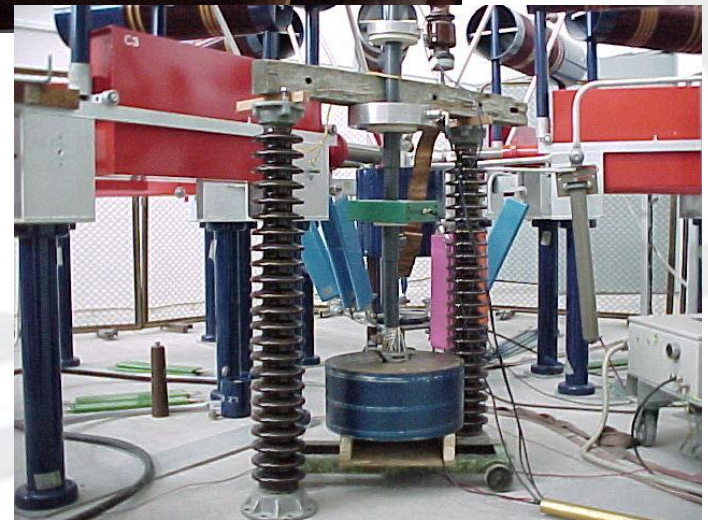
Manipulación del Trafo Tipo Estándar (DI)



Pruebas de Campo y Laboratorio (ATS)

- ☐ Cortacircuitos
- ☐ Aisladores
- ☐ Estructura - Cruceta
- ☐ Descargadores de sobretensión y fusibles
- ☐ Transformadores tipo estándar

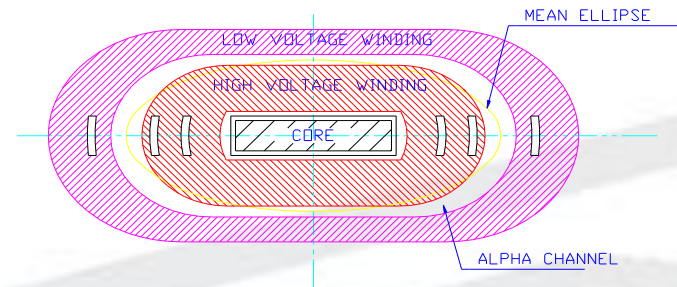
Los elementos ensayados cumplen con los valores establecidos en las normas en lo referente a los niveles de aislamiento para condición normal y contingencia.



Modelamiento matemático del transformador de distribución ATS)

Cálculo de capacidades

Ecuaciones basadas en métodos electromagnéticos o por medio del método de Simulación de cargas.



$$C = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot l}{\text{arcosh}(R_2/c) - \text{arcosh}(R_1/c)}$$

Cálculo de Inductancias

En ambos casos (trafos mono y trifásicos) la inductancia propia fue calculada por medio de una expresión analítica derivada de consideraciones de campos electromagnéticos.

$$M = \mu_0 N_1 N_2 \int_{-l_2}^{l_2} \int_{-l_1}^{l_1} \int_0^\pi \frac{r_1 r_2 \cos \psi' d\psi' dz_1 dz_2}{\sqrt{(z_1 - z_2)^2 + r_1^2 + r_2^2 - 2 r_1 r_2 \cos \psi'}}$$

$$L = \mu_0 N^2 \int_0^h \int_0^h \int_0^\pi \frac{\frac{a^2 b^2 \cos \psi'}{a^2 + (b^2 - a^2) \cos^2 \psi'}}{\sqrt{(z_1 - z_2)^2 + \frac{2 a^2 b^2 (1 - \cos \psi')}{a^2 + (b^2 - a^2) \cos^2 \psi'}}} d\psi' dz_1 dz_2$$

Parámetros medidos y calculados (ATS)

Trafos monofásicos

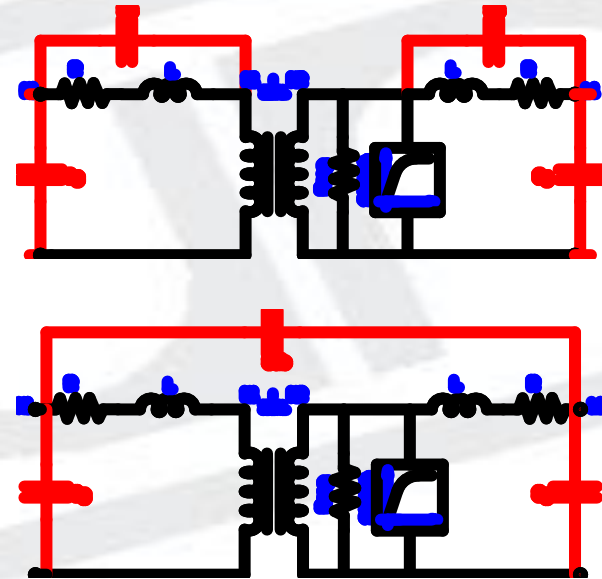
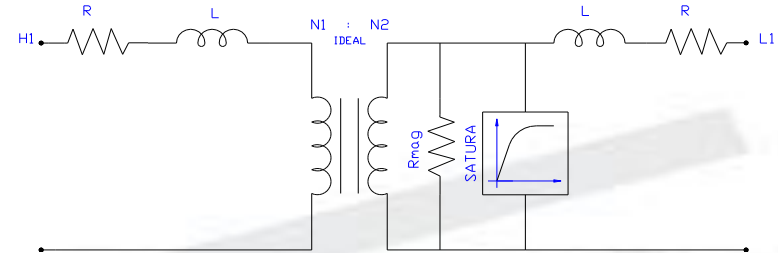
Bobina	Cg HV(pF)	Cg. LV(pF)	C_{A_B} (pF)	L. HV: (mH)	L. LV: (mH)
Valor calculado	471.2	621.8	897.1	662.9	305.8
Valor medido	424.0	649.0	817.0	468.5	268.8

Trafos trifásicos

Bobina	Cg.HV (pF)	Cg.LV (pF)	C_{A1-B1} (pF)	C_{B1-B2} (pF)	L. HV (mH)	L. LV (mH)
Valor calculado	317	192	784.5	126	653	341
Valor medido	340	215	744	99	580	435

Modelo matemático (ATS)

Para la implementación computacional del modelo del transformador de distribución se utilizó el programa EMTP/ATP, con el módulo "Transformer", el cual permite incluir las capacidades y la curva de saturación. Se desarrollaron tres modelos para cada tipo de transformador. Cada uno de los cuales permite representar el comportamiento del transformador ante señales de media, baja y alta frecuencia (60Hz hasta impulsos tipo rayo).

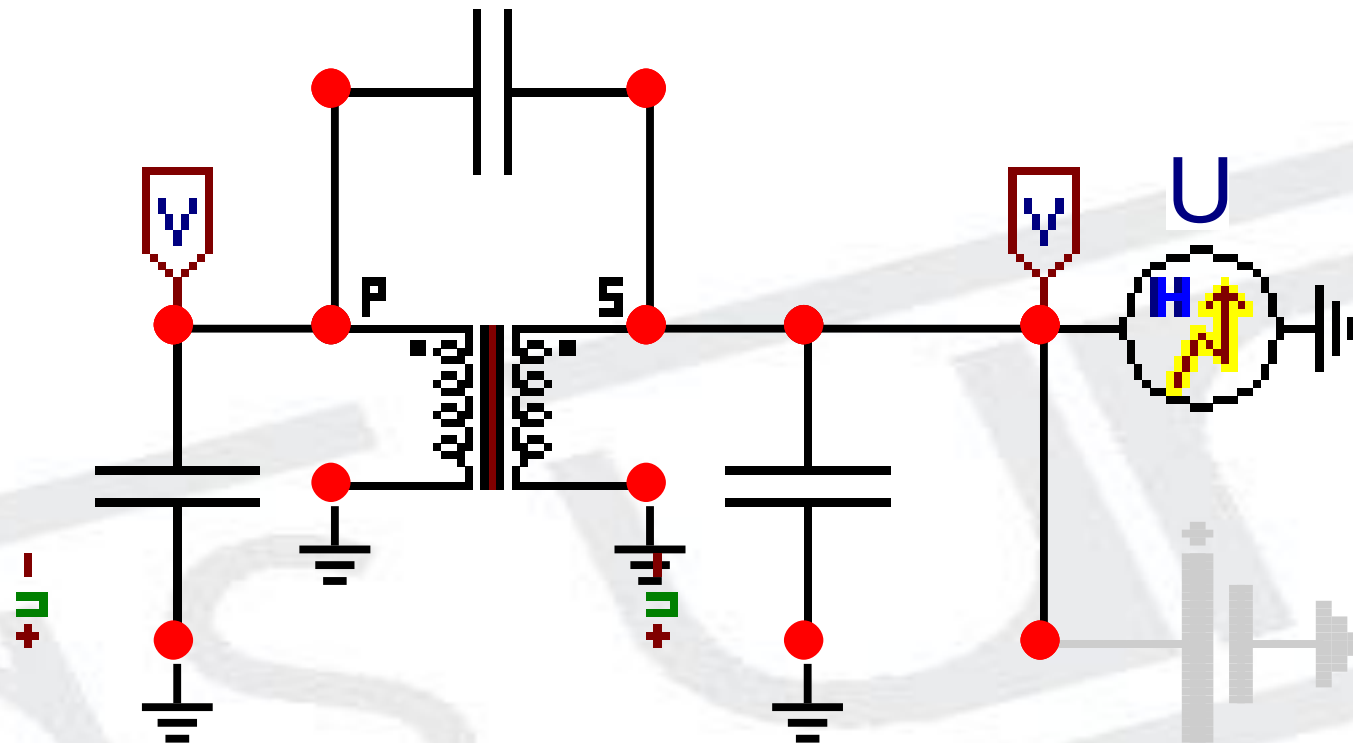


Transformador Prototipo Nuevo

Diseño (ATS)

1. Mayor robustez: Incremento del BIL del transformador
2. Reducción del Pulso Transferido: Diseño Bobina - Núcleo
3. Fácil manipulación: Modificación de los soportes mecánicos para transporte en zonas de difícil acceso
4. Mejoramiento de las Protecciones: Descargadores en AT y BT, Autoprotección (CSP), protecciones adicionales en red si es necesario
5. Manipulación e instalación adecuada: Garantía de vacío (0.2 atm.) y reposo antes de la energización. O utilizar llenado integral (sin colchón de aire)
6. Mejoramiento de Puestas a Tierra: Puestas a tierra de bajo valor ohmico.
7. Monitoreo y Mantenimiento permanente del sistema - entorno (Red, protecciones, transformador, puestas a Tierra, vegetación)
8. Evaluación de la relación Costo / Beneficio

Modelo de transformador

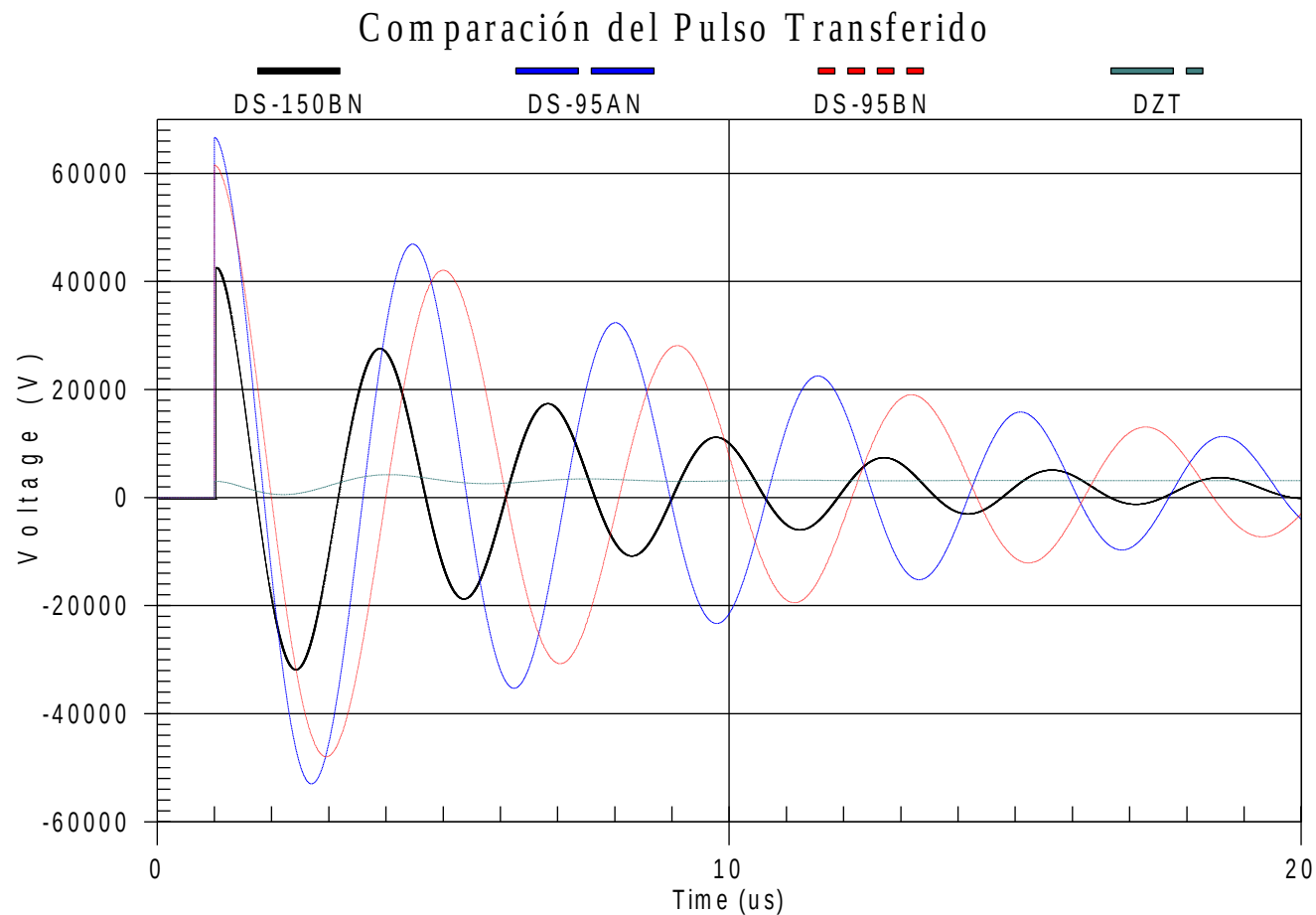




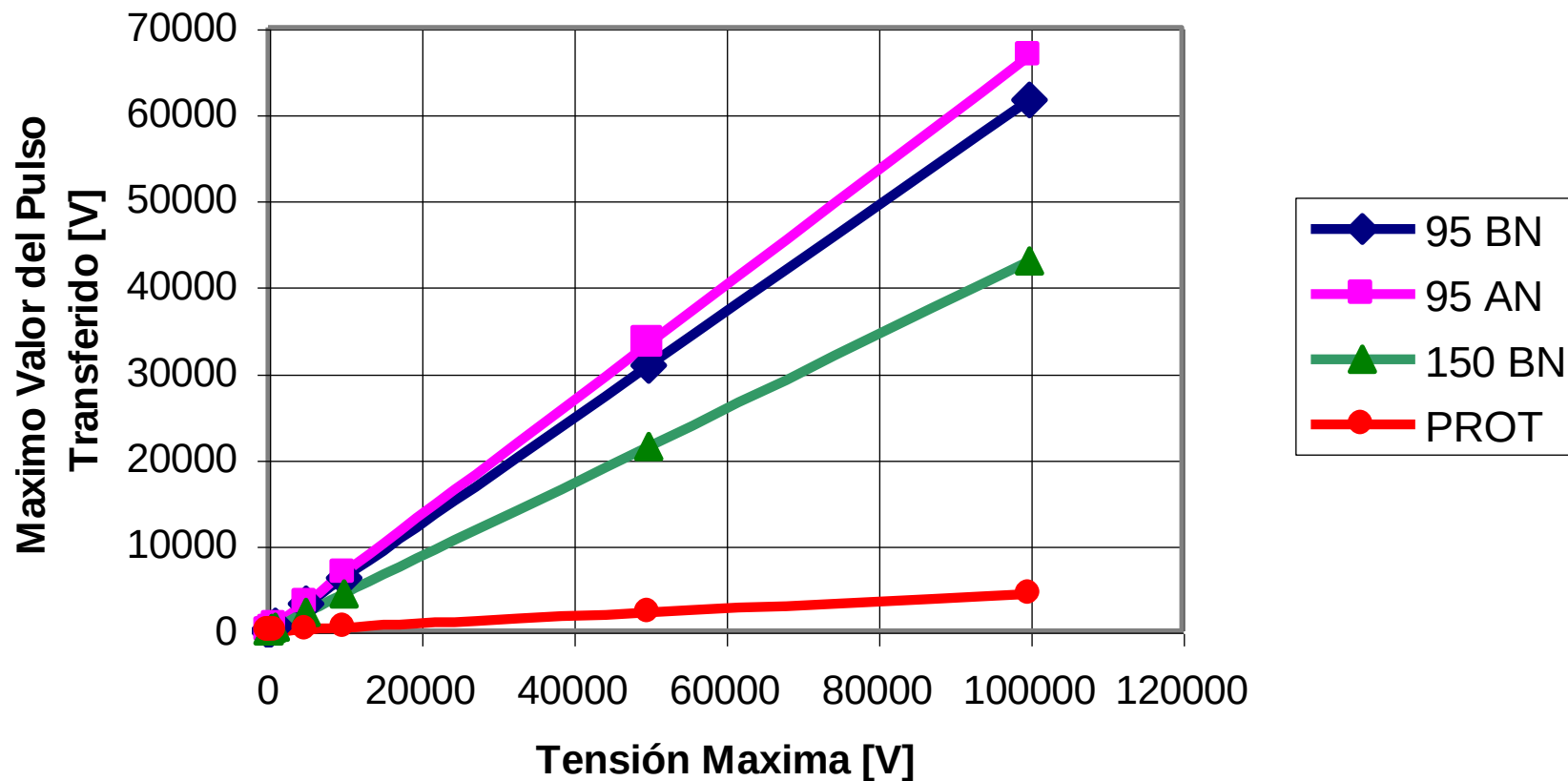
DS-95AN.pl4: v:BAJA

dzt.pl4: v:ALTA v:BAJA

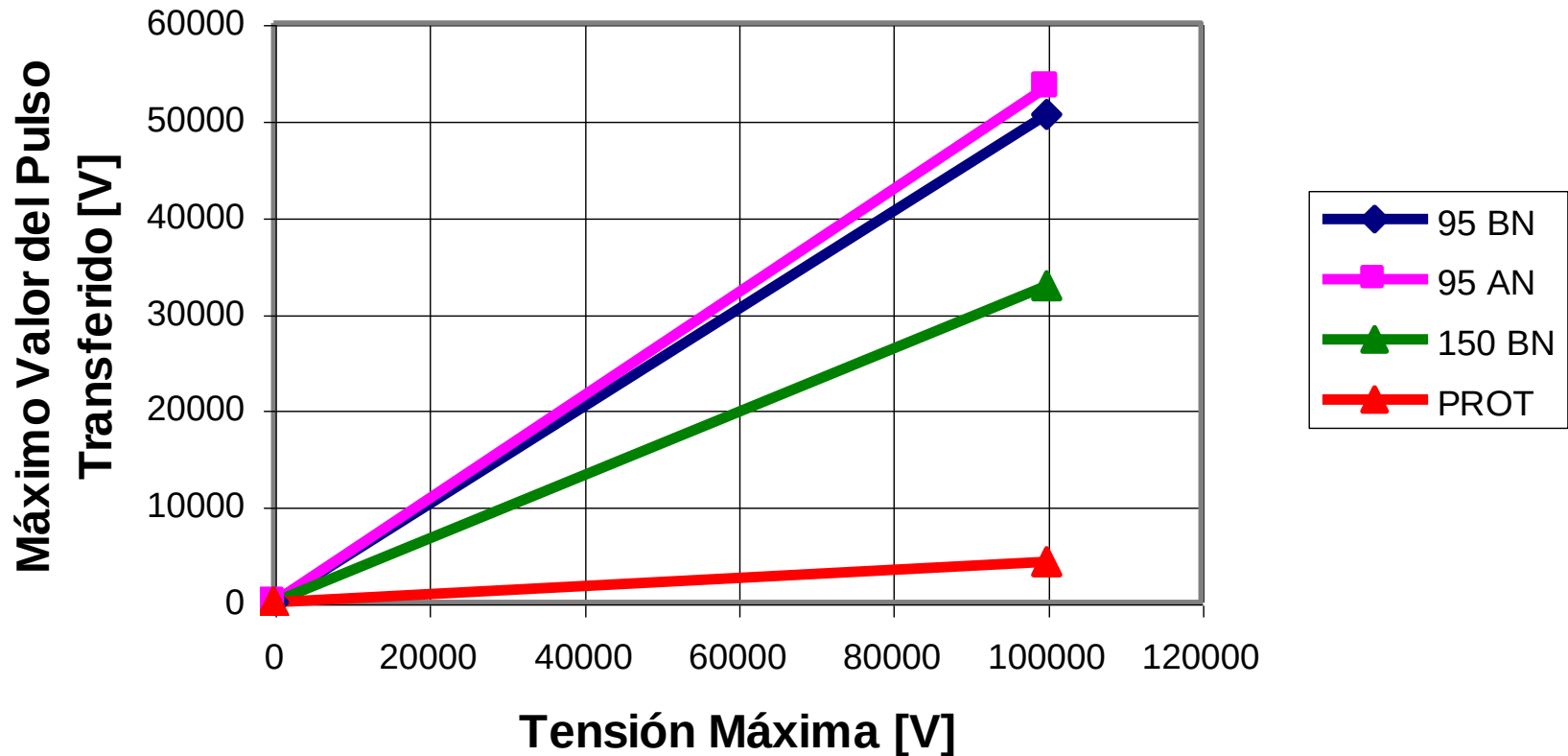
Comparación pulso transferido



Pulso Transferido Para 4 Clases de Transformadores (Onda Paso)

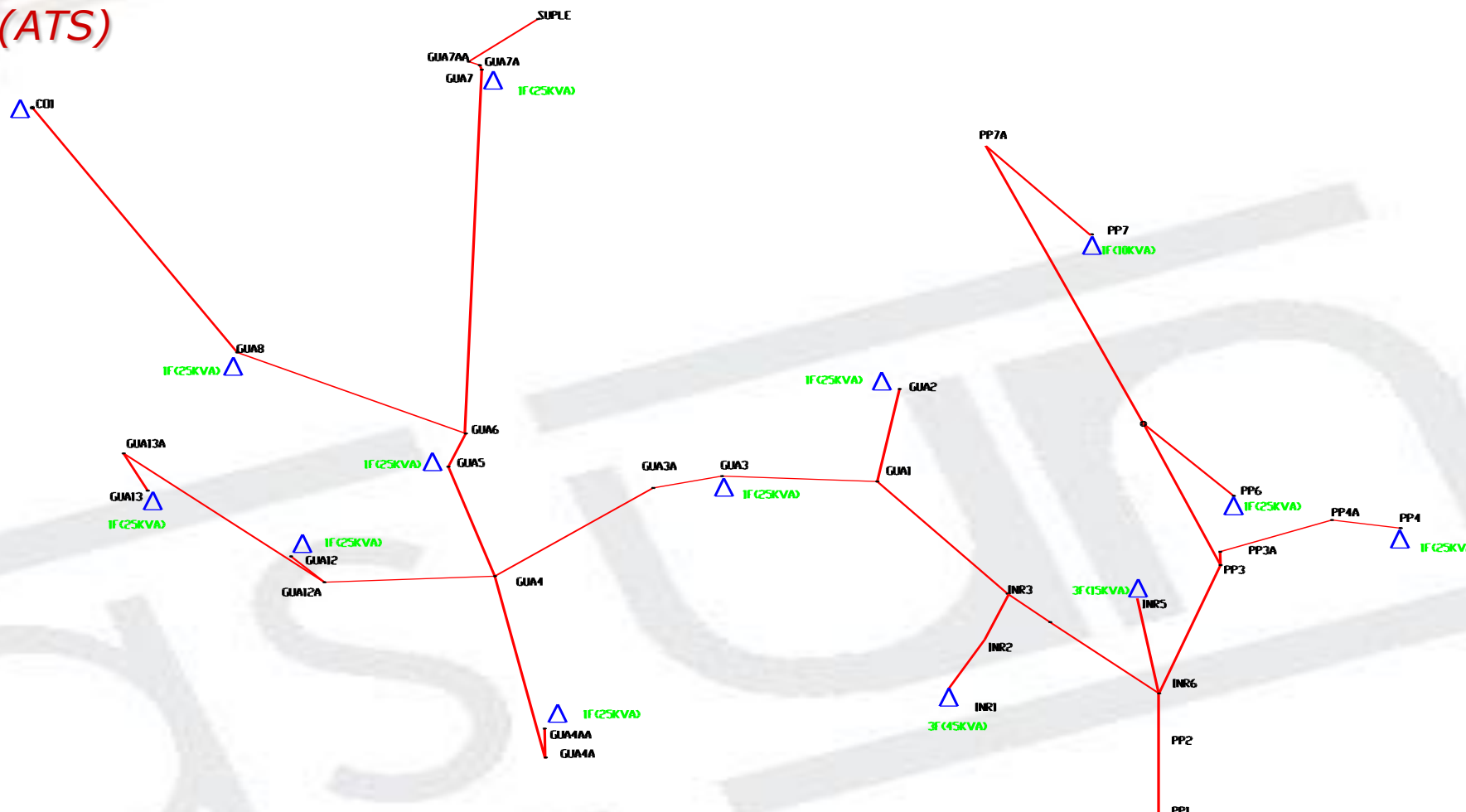


Pulso Transferido para 4 clases de Transformadores (Onda Tipo Rayo)

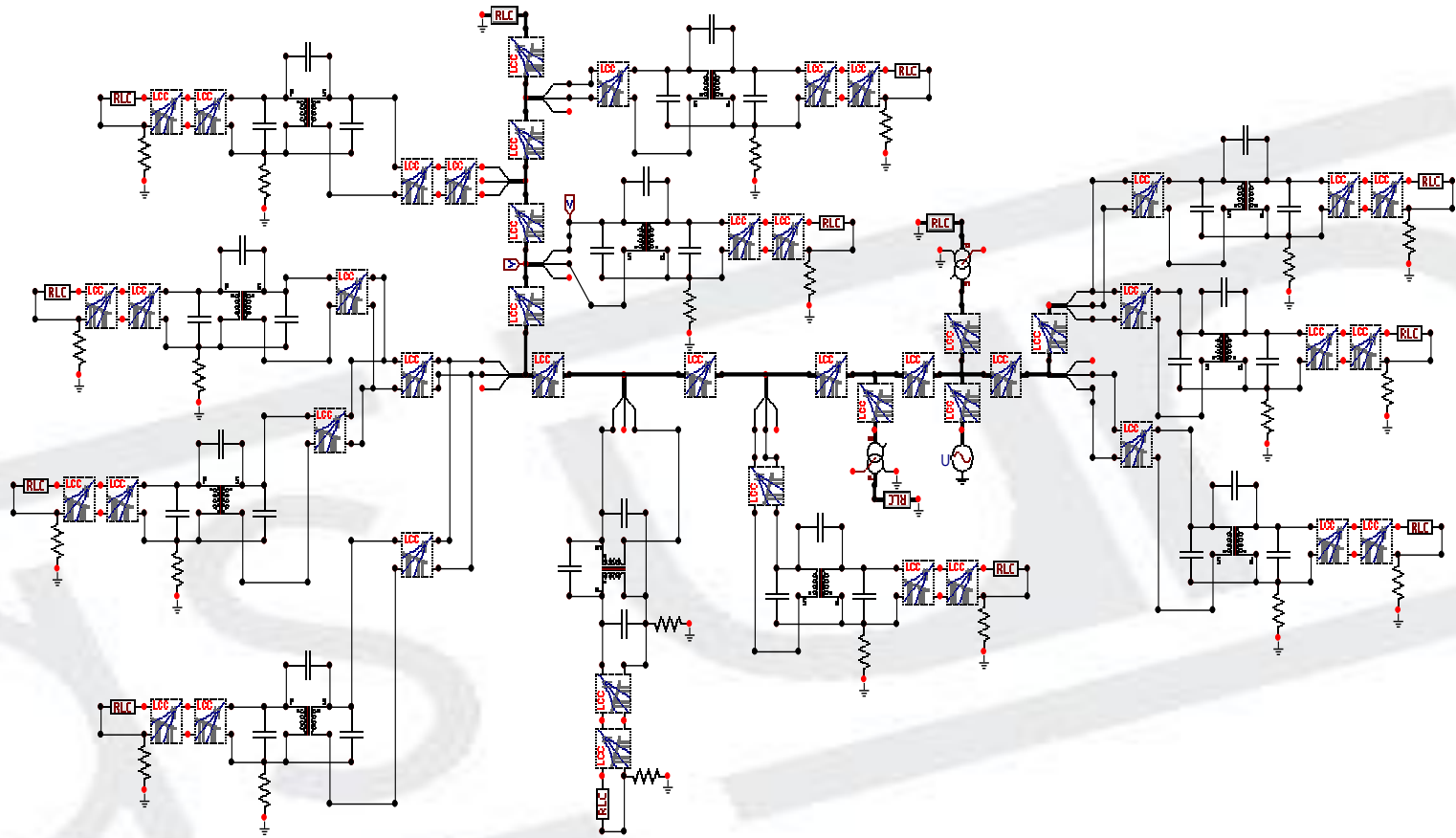


Circuito Experimental Guachipay

(ATS)



Circuito experimental montado en el ATPDraw (ATS)



Manipulación del Trafo Prototipo Nuevo Diseño (ATS)



Trafos Prototipo Nuevo Diseño

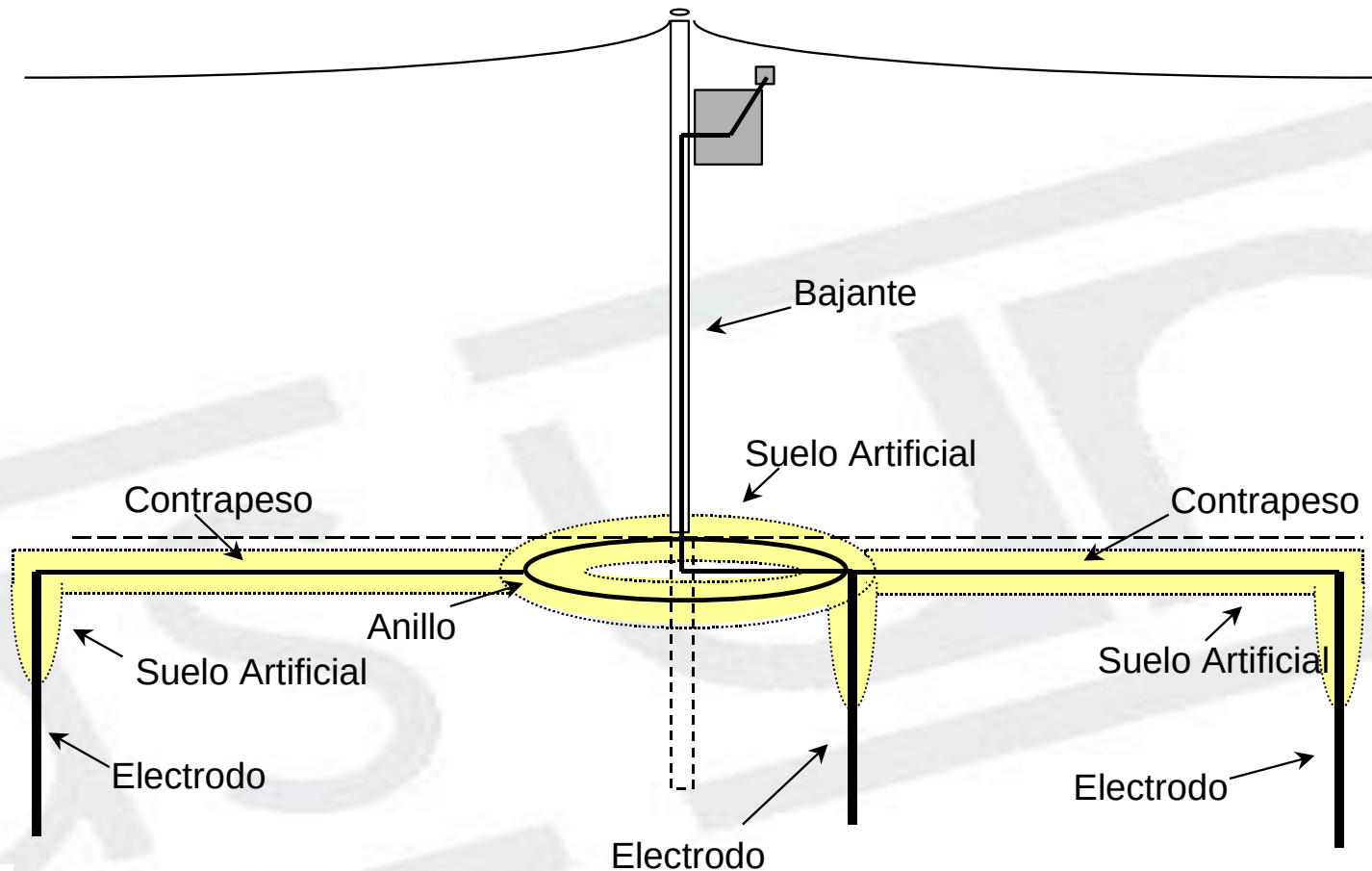
(ATS)



Instalación del Trafo Prototipo Nuevo Diseño (ATS)



Nuevo Diseño del sistema de puesta a tierra (ATS)



Seguimiento de los valores de puesta a tierra (CM)

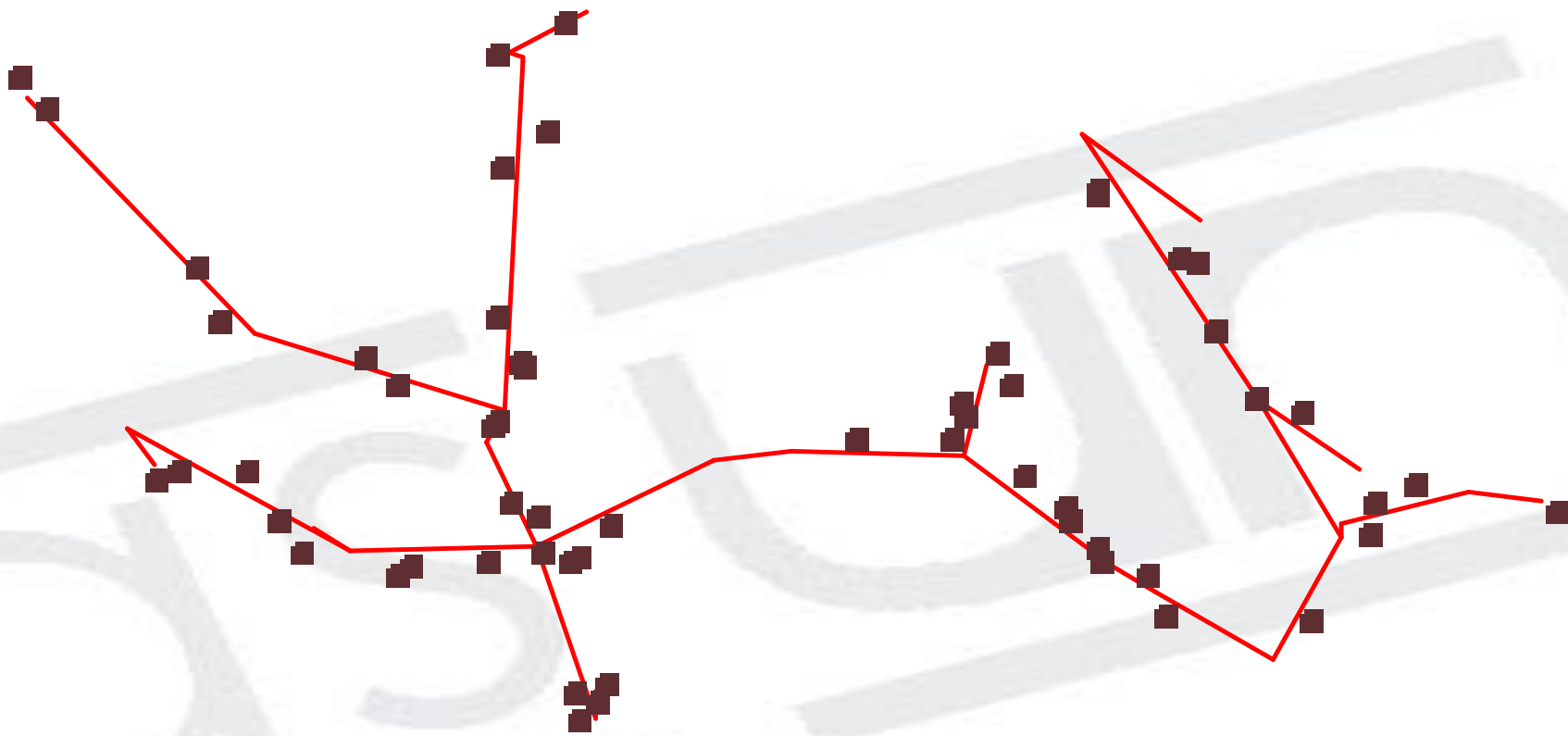
Transformador	$R_{inicial} [\Omega]$	Dic. 97	Mar. 98	May. 98	Sep. 98	Mar. 99
<i>Insp. Naranjal</i>	1088	3.3	2.56	2.33	206	2.02
<i>Ac. Naranjal</i>	158	17.7	17.99	10.04	6.97	11.58
<i>Jaime Ariza</i>	140	12.94	10.46	8	8.81	8.39
<i>Mard. Prieto</i>	107	6.84	7.08	6.35	10.4	7.54
<i>Ana de Torres</i>	231	11.8	10.81	10.41	10.67	9.65
<i>Pablo Bustos</i>	77	9.3	8.51	7.47	8.79	8.93
<i>Ant. Gaitán</i>	271	8.32	7.21	7.15	6.92	7.15
<i>Enr. Bustos</i>	208	11.45	11.81	10.49	11.61	10.47
<i>Reyes Anzola</i>	88	3.52	5.44	3.5	3.61	4.02
<i>Fid. Bustos</i>	225	5.31	5.12	5.19	5.39	4.88
<i>Mel. Virgüez</i>	15	6.94	4.77	5.3	4.48	5.81
<i>Ant. Alvarez</i>	262	-	-	-	11.73	14.04
<i>Marc. Olivares</i>	301	-	-	-	18.32	18.35
<i>Julio Beltrán</i>	260	-	-	-	23.13	21.25

Relación Costo – Beneficio (ATS)

Nivel de Riesgo Por Rayos	Índice de Fallas (promedio anual %)	% Transformadores Fallados en 10 años	Costos reposición de <u>trafos tipo estándar</u> por cada 100 trafos estándar instalados en el año cero
Alto	12.86	335	335.000.
Medio	8.62	329	329.000.
Bajo	4.82	160	160.000.

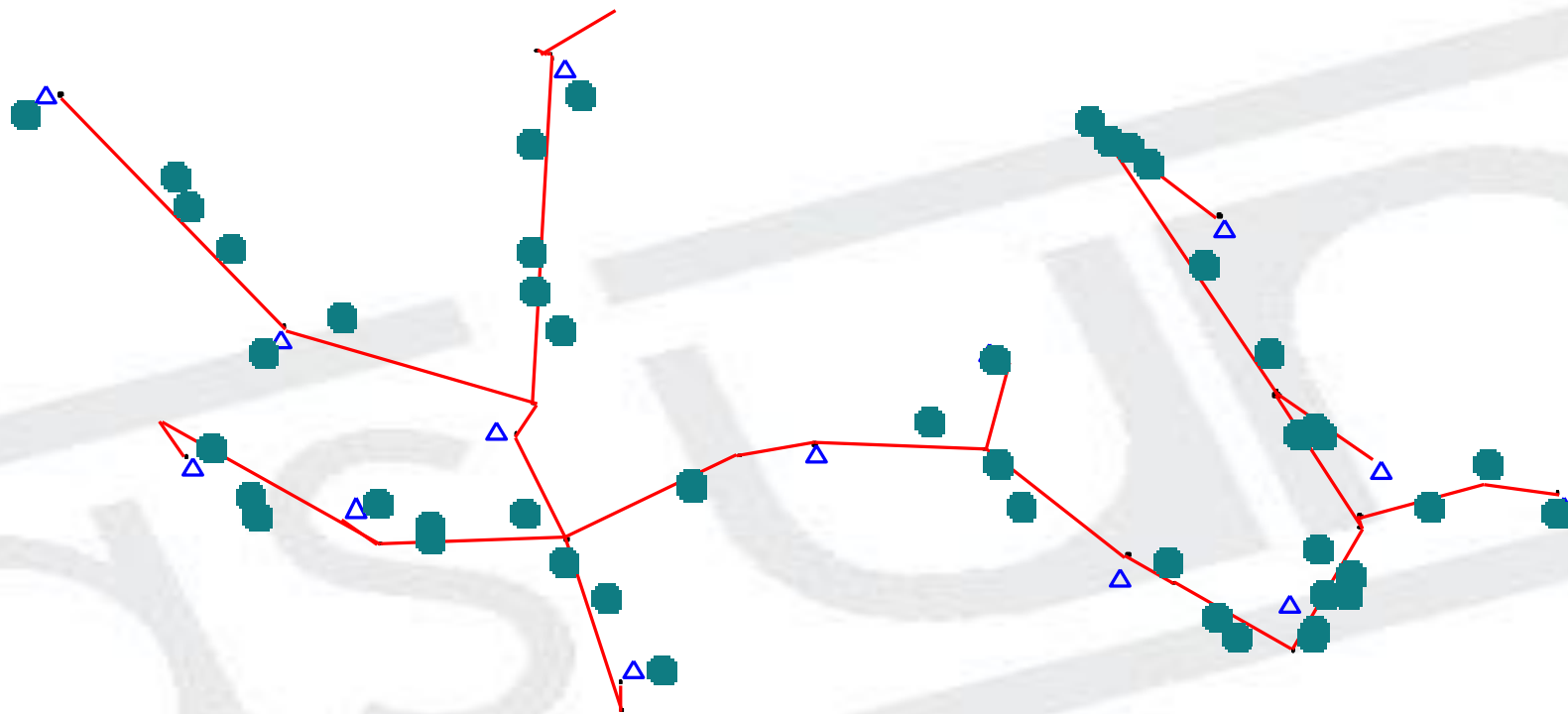
Seguimiento actividad de rayos

(58 rayos – Año 1998 – 1 evento, 0% fallas) (CM)



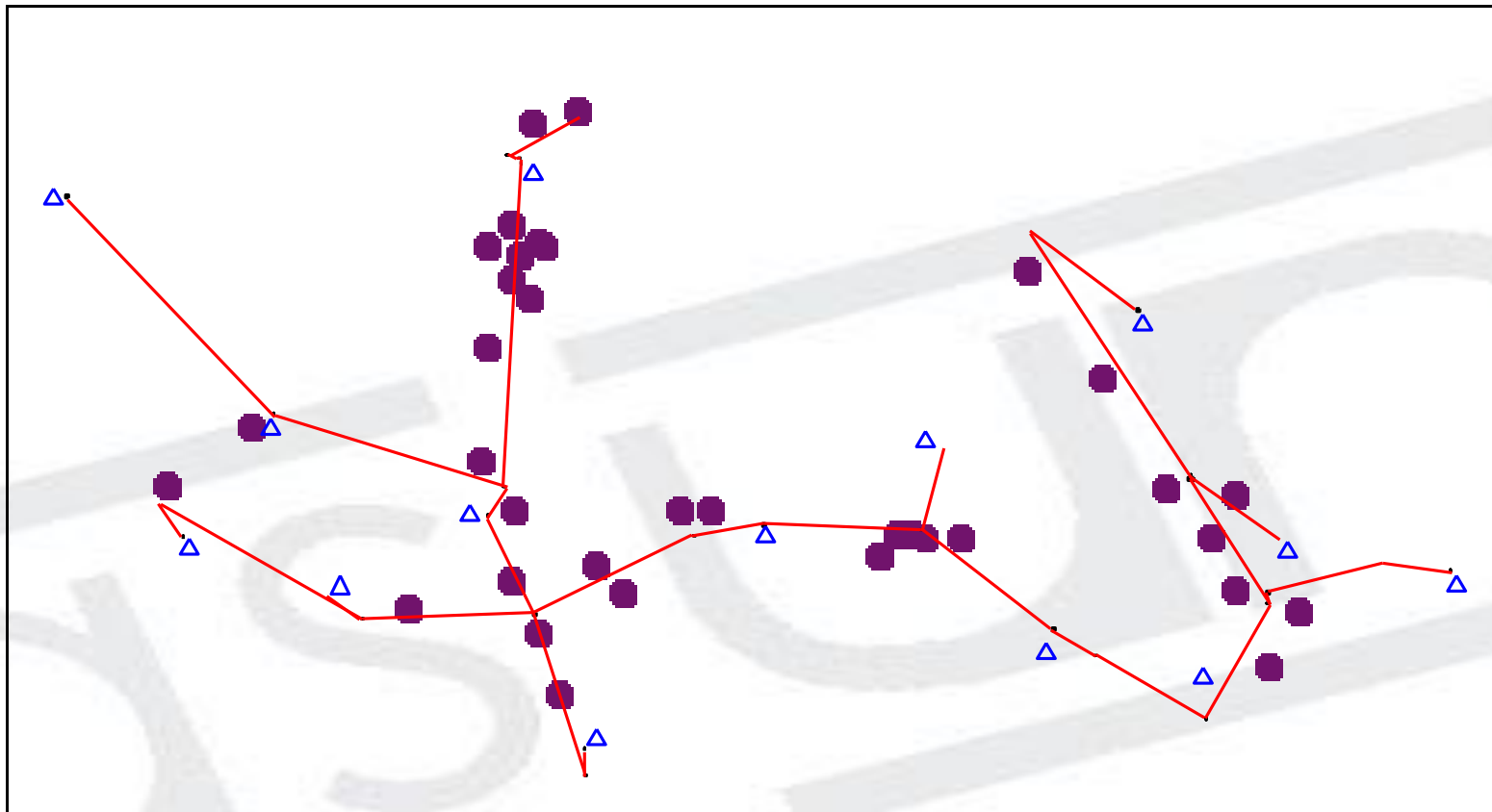
Seguimiento actividad de rayos

(44 rayos – Año 1999 – 7% fallas) (CM)



Seguimiento actividad de rayos

(35 rayos – Año 2000 – 0% fallas) (CM)



Conclusiones

- Los circuitos piloto experimentales de Guachipay (Cundinamarca) y Samaná (Caldas) localizados en una de las dos zonas de mayor actividad de rayos del mundo, muestran resultados promisorios para la solución al problema de falla de transformadores de distribución en Colombia. Por ejemplo, para el Circuito Piloto Experimental de Guachipay, luego de instalados los transformadores Prototipo Nuevo Diseño, la rata de fallas pasó del **50%** para el periodo 1990 - 1997, a **0%** en el año 1998, **7%** en 1999 y **0%** en 2000.

Aplicaciones recientes de la metodología:

MEJORAMIENTO DE ÍNDICES DE CALIDAD DE LOS CIRCUITOS DE DISTRIBUCIÓN RURAL DE CODENSA EN ZONAS DE ALTA ACTIVIDAD ELÉCTRICA ATMOSFÉRICA

*CODENSA S.A. ESP
UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA*

Septiembre de 2010

Alcance

- Mejorar la *Calidad de la Energía*, reduciendo en zonas rurales los índices DES y FES y, por lo tanto, el costo de las compensaciones.
- Reducir la cantidad de *demandas* por el daño de equipos en instalaciones de los usuarios.
- Reducir los *costos de reposición* de equipos fallados
- Reducir las pérdidas económicas debidas a *energía no suministrada*

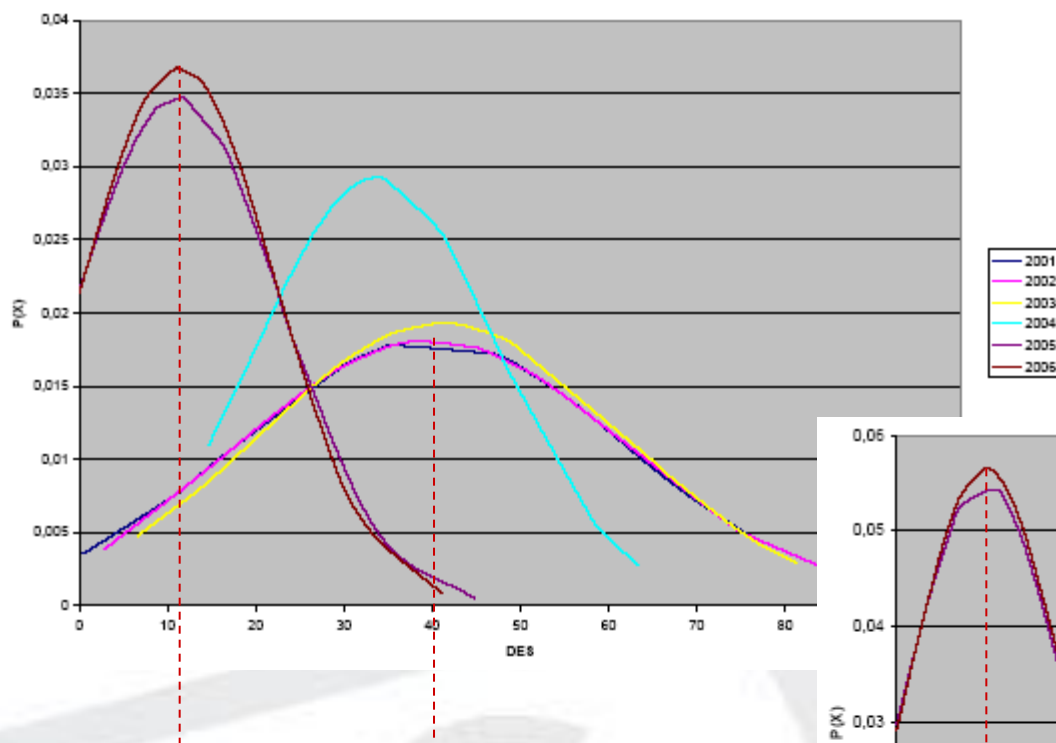
Metodología

- "Región piloto" ubicada en una zona con un alto número de salidas de líneas y alta actividad eléctrica atmosférica.
- "Circuito piloto" dotado con equipos de **medición de Tensiones Inducidas**. Media tensión (hasta 34.5 kV) y baja tensión.
- Red de monitoreo de actividad eléctrica atmosférica para la Región (muy bajo costo y gran volumen de información)
- Monitoreo de fallas y causas en el circuito piloto

Selección del Circuito Experimental

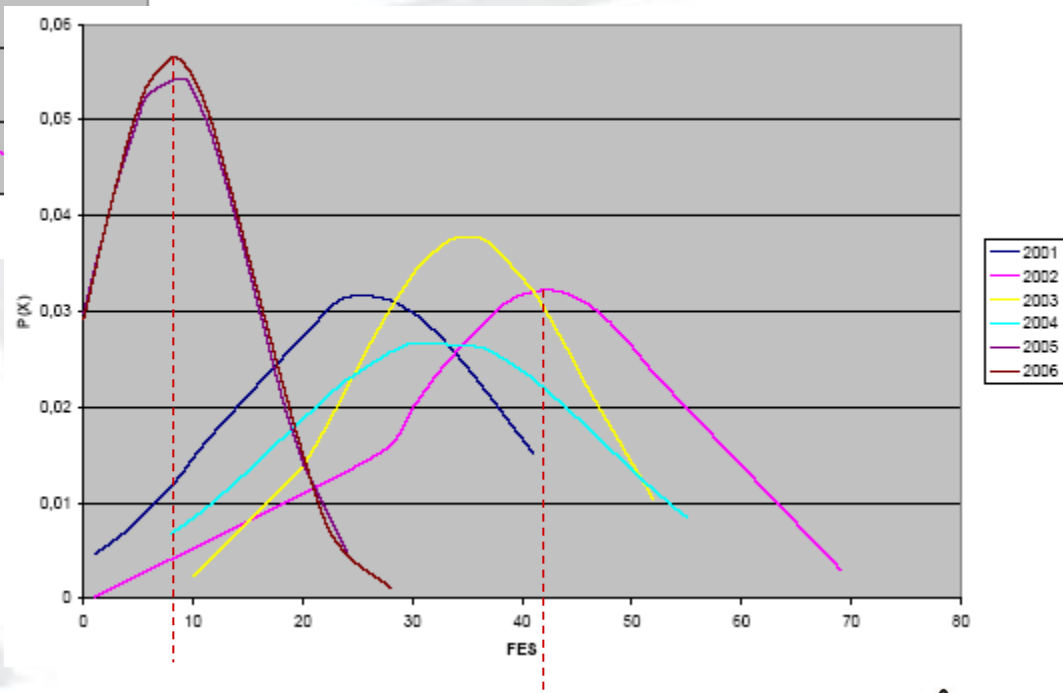
- ☐ *Zona de Rionegro - Cundinamarca (23 circuitos)*
- ☐ *Zona con alto índice de fallas por descargas eléctricas atmosféricas.*
- ☐ *Información de índices de DES y FES durante año 2001-2007*
- ☐ *Análisis Estadístico*
- ☐ *Selección de 9 circuitos*

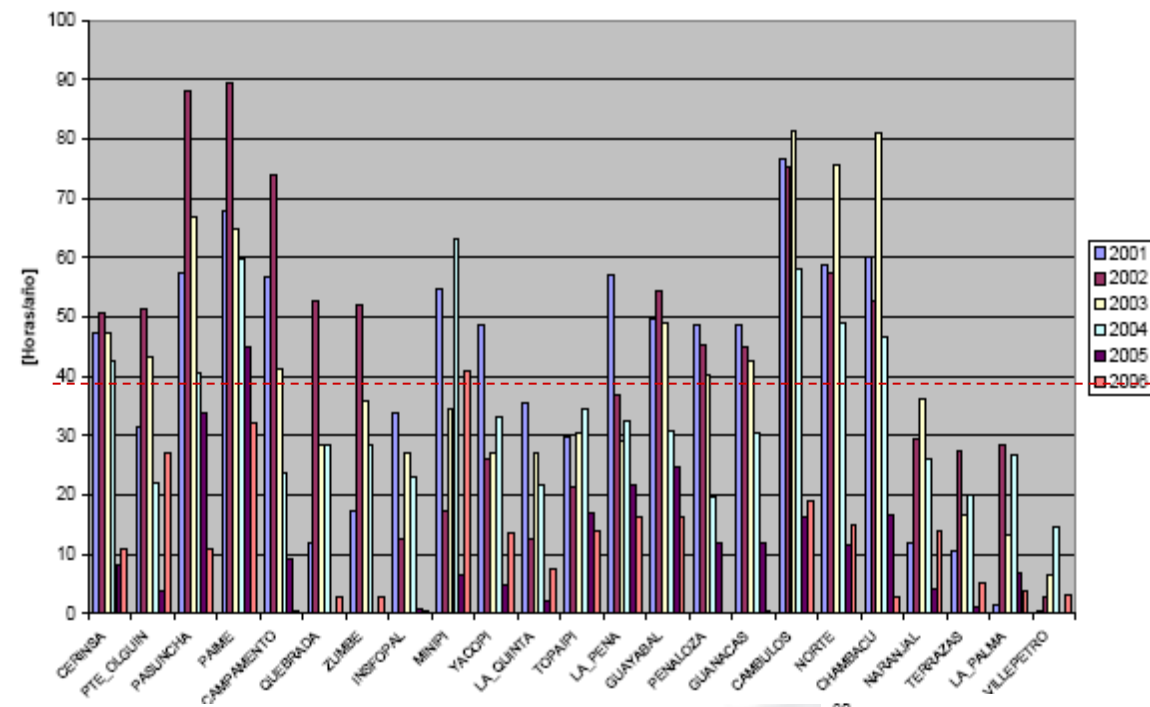
DES y FES histórico en Rionegro (2001-2006)



Res CREG 096/2000

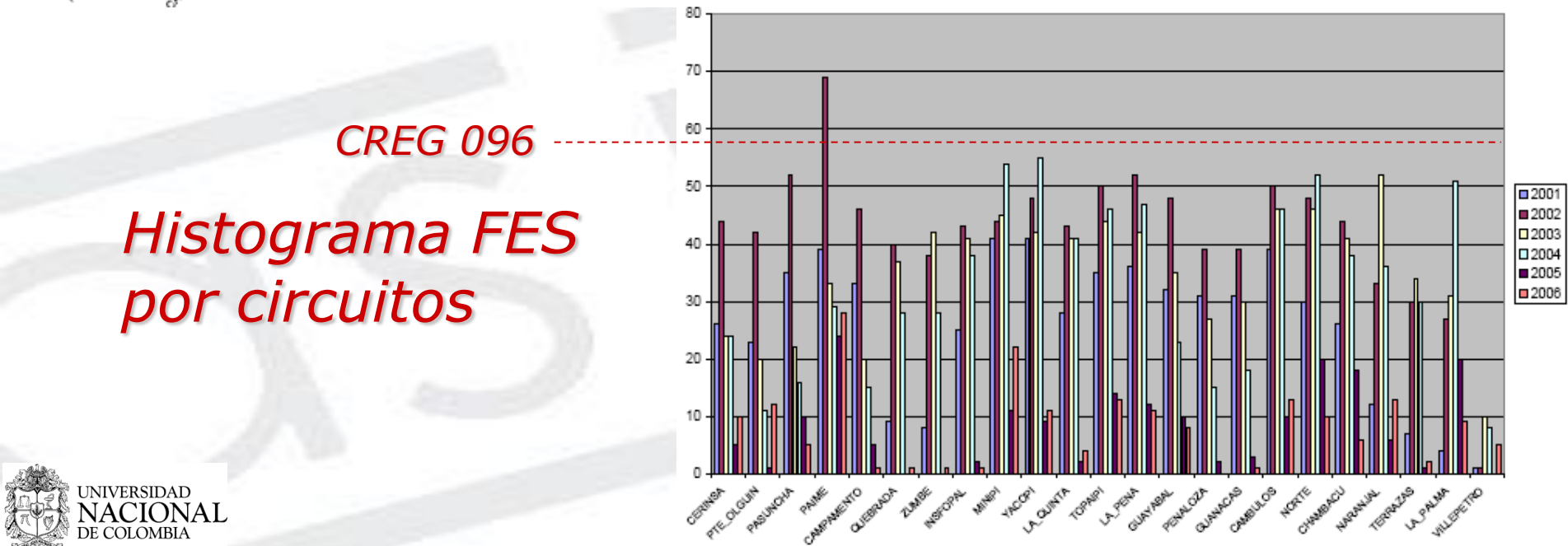
	DES (Horas)	FES
GRUPO 1	11	26
GRUPO 2	19	44
GRUPO 3	29	51
GRUPO 4	39	58





Histograma DES por circuitos

CREG 096



CREG 096

Histograma FES por circuitos

Datos circuitos seleccionados

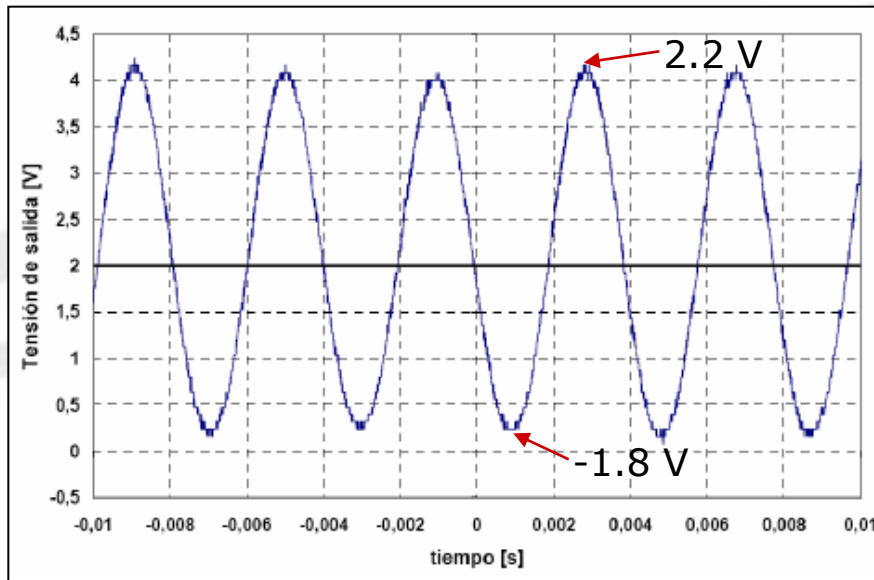
Nº	Circuito		Grupo	Ancho(km)	Largo(km)	Altura (m)
	Código	Nombre				
4	VG12D	PAIME	3	22	12,5	800-1600
9	LM12D	MINIPI	4	25	14	1200-1600
10	LM13D	YACOPI	4	27	30	800-1600
12	LM22D	TOPAIPÍ	4	13	12	800-1800
13	LM23D	LA_PENA	4	9	17	800-1600
17	RR11D	CAMBULOS	4	15	6	600-1600
18	RR12D	NORTE	4	30	15	1000-2000
19	RR13D	CHAMBACU	4	2	3	1000-1600

 *Circuito seleccionado*

Datos circuito Minipí

<i>Variable</i>	<i>Valor</i>
Grupo	4
kVA's Instalados	3400
Longitud aprox MT (km)	159
Longitud aprox BT (km)	308
Cantidad de Usuarios	2167
Cantidad de Trafos	255
Nivel de tensión	13.2 kV
Incidencias debidas a rayos	79 %

Molinos de Campo MCE-UN



Principio de medición

- Principio de inducción de carga superficial
- Ventanas de inducción
- La frecuencia de medición depende de la frecuencia de giro y del número de ventanas

Detección de la polaridad (Innovación Tecnológica)

- Capacidad variable del instrumento
- Señal asimétrica
- Reducción de componentes electrónicos
- La detección de polaridad se realiza mediante software

Ubicación de Molinos de Campo Eléctrico MCE



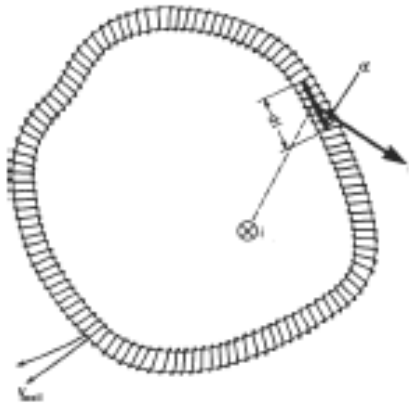
Alturas de localización de los MCE

Estación de medida	Altura sobre el nivel del mar (m)
MCE La Palma	1447
MCE La Aguada	1607
MCE El Castillo	1490
MCE Sabaneta	1562
MCE Caparrapi	1263



MCE La Palma, sede CODENSA

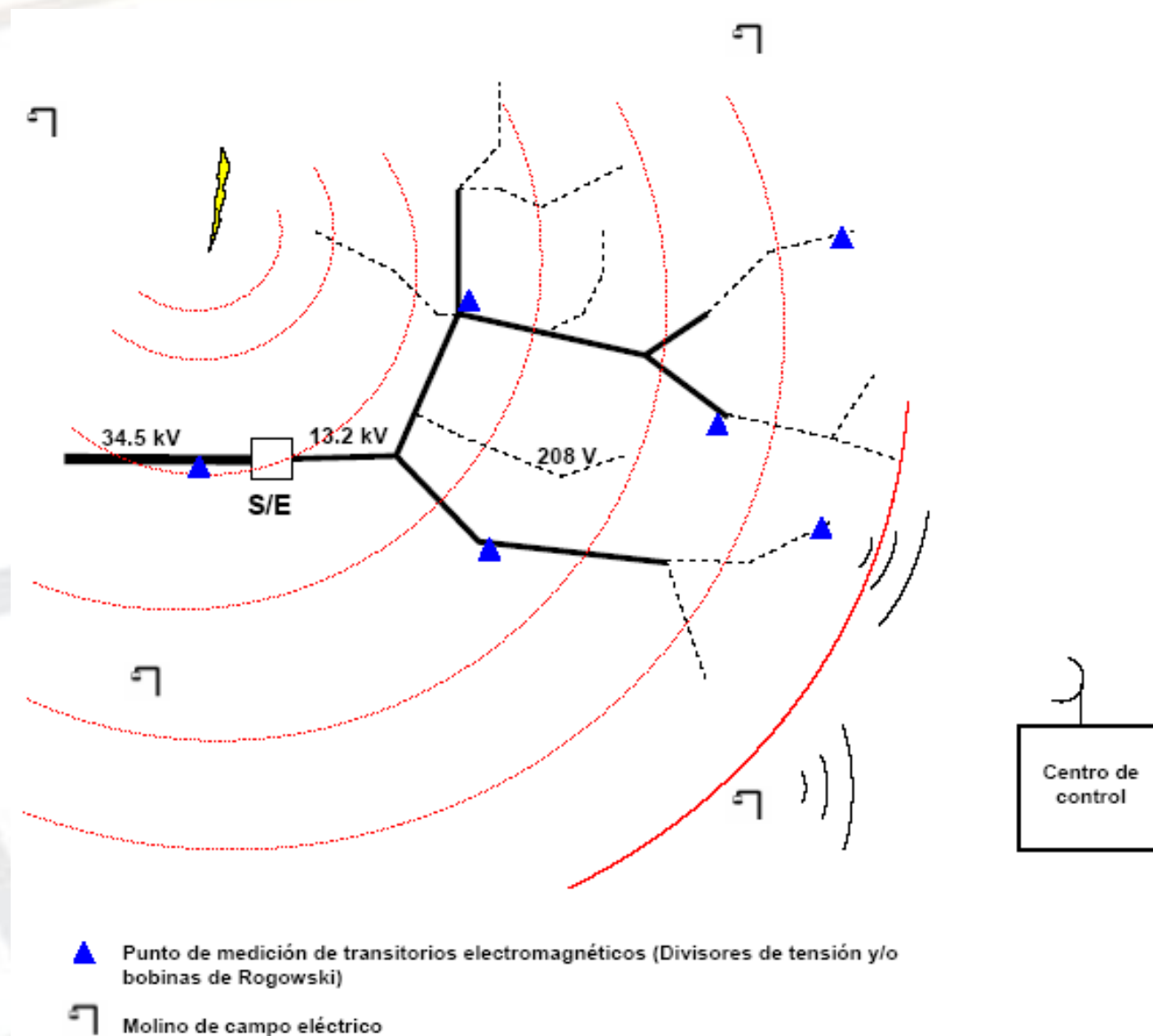
Bobina de Rogowsky



$$V_{coil} = -\frac{d\Phi}{dt}$$



Sistema experimental



Sistema de medida (OE1,2,3)

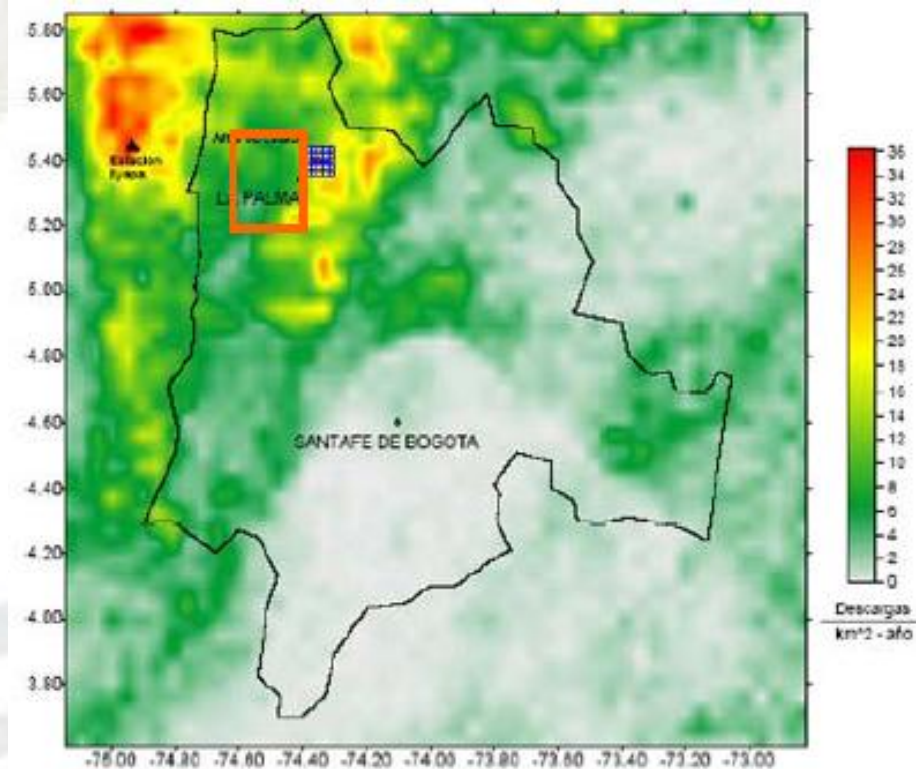


Figura 1. Región de estudio

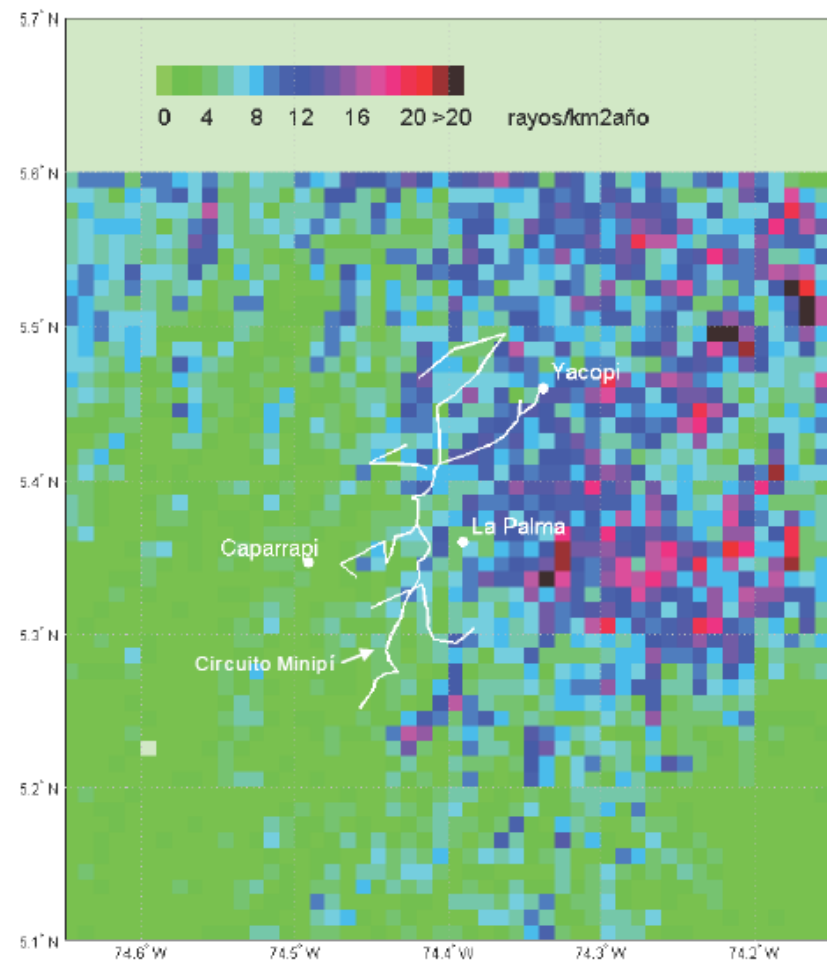
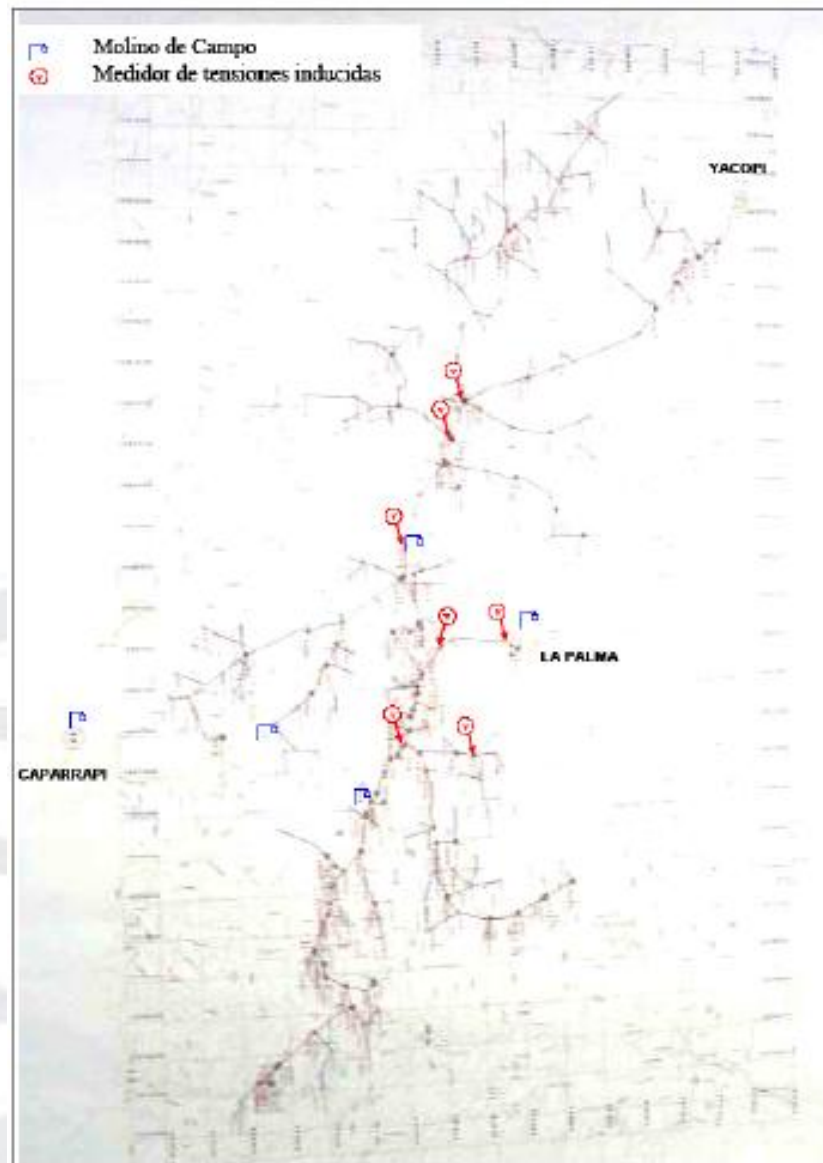


Figura 2.1. Densidad de Descargas a Tierra en la región de estudio

Sistema de medida (OE1,3)



Sistemas de Medida de Campo Eléctrico (OE1,2,3)



La Palma



El Castillo



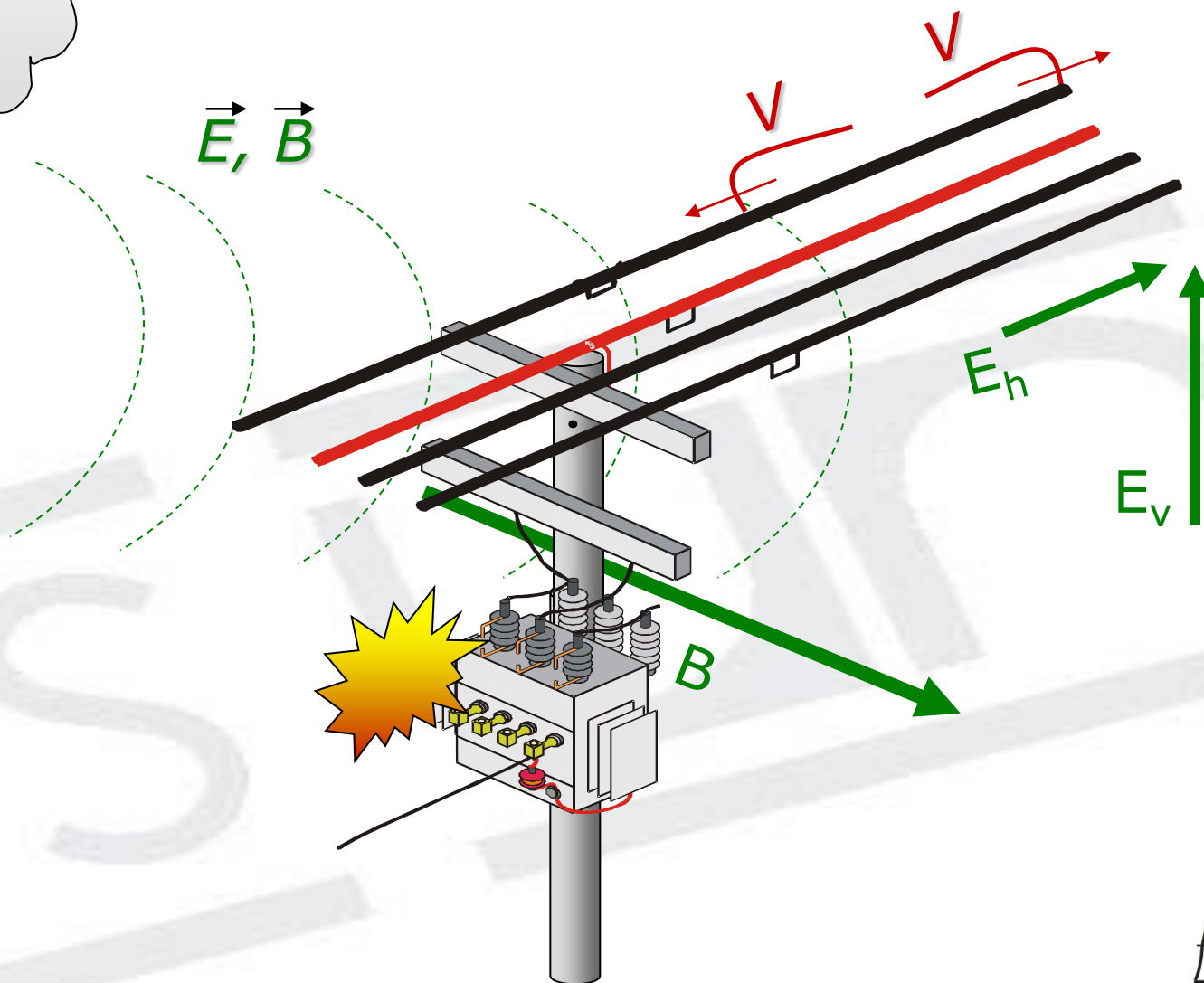
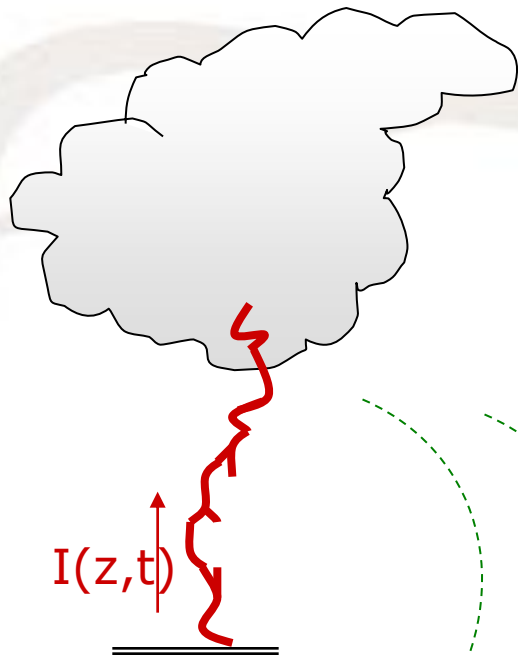
Sabaneta



Caparrapi



La Aguada

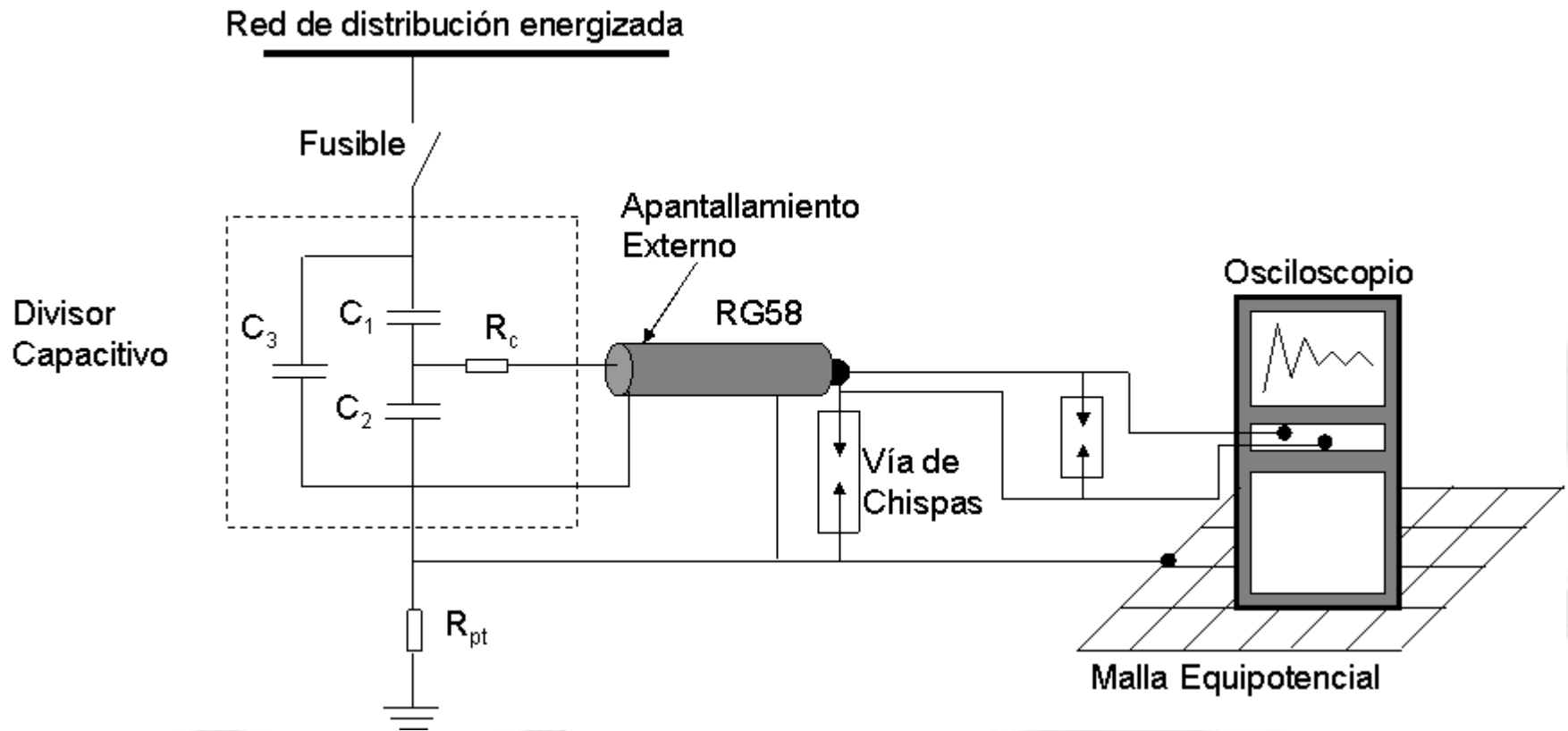


Medición de tensiones inducidas



- ☐ *Uso de Fibra Óptica y Energía Solar*
- ☐ *BIL de 240kV*
- ☐ *Osciloscopio de 200MS/s*
- ☐ *Relación 100.000:1*

Medición de tensiones inducidas



Sistemas de medida de tensiones inducidas (OE1,2,4)



El Castillo 2



La Aguada



El Castillo



La Cañada

Medida de Tormentas Eléctricas

(OE3,4)

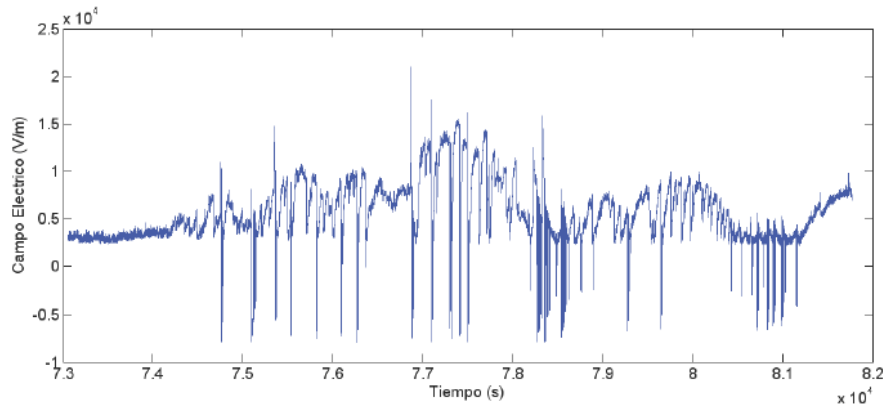


Figura 3.6. Tormenta eléctrica con actividad de rayos positivos. Estación Caparrapi, 23 de noviembre de 2009

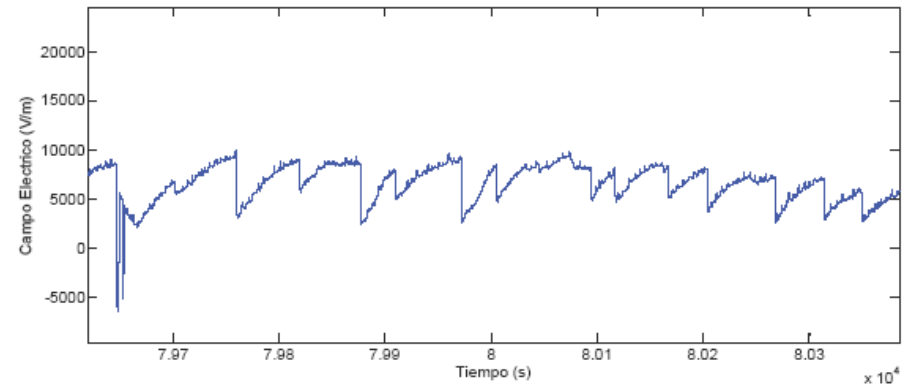


Figura 3.7 Variaciones de campo eléctrico medidas por los molinos de campo

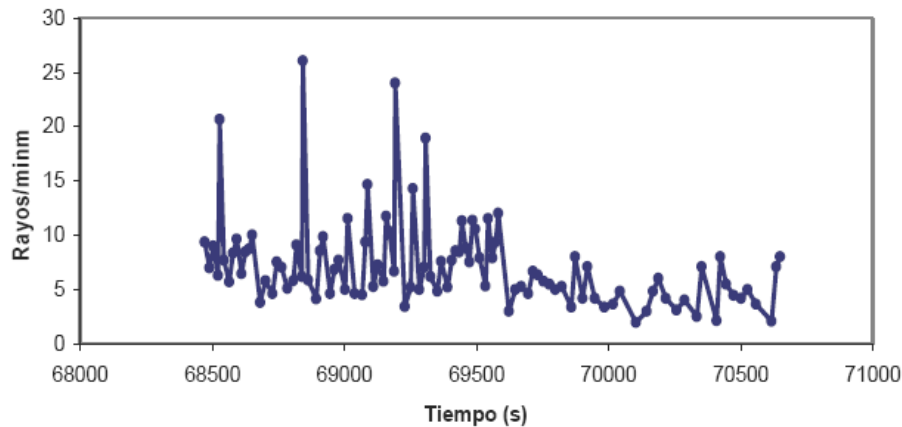
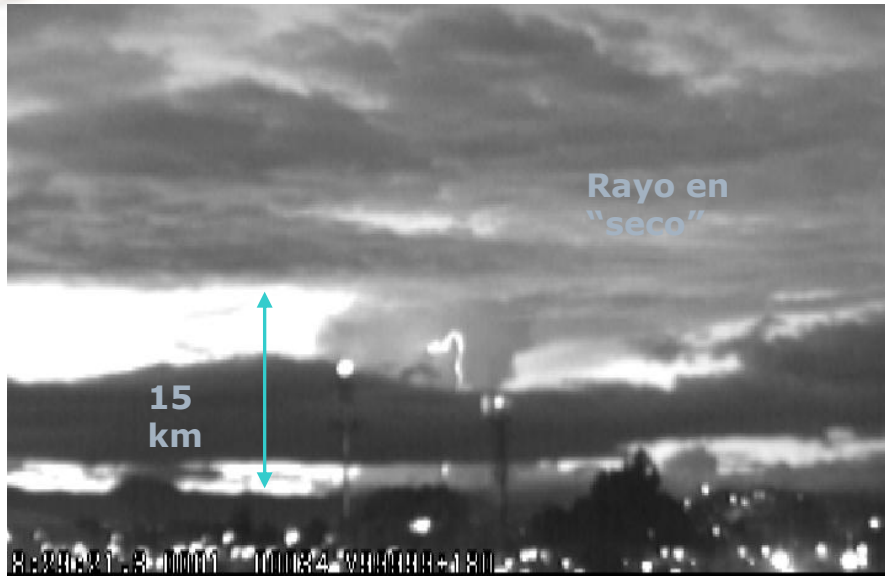


Figura 3.8 Numero de rayos producidos por minuto ocurrida el 23 de noviembre de 2009

Parámetros importantes para el dimensionamiento de protecciones

Actividad de Rayos Positivos

(OE3,4)



La energía de los rayos positivos es mucho mayor:

Flash (-)	7.5 C	0.55 MJ/ Ω	200 μ s
Flash (+)	80 C	15 MJ/ Ω	2000 μ s

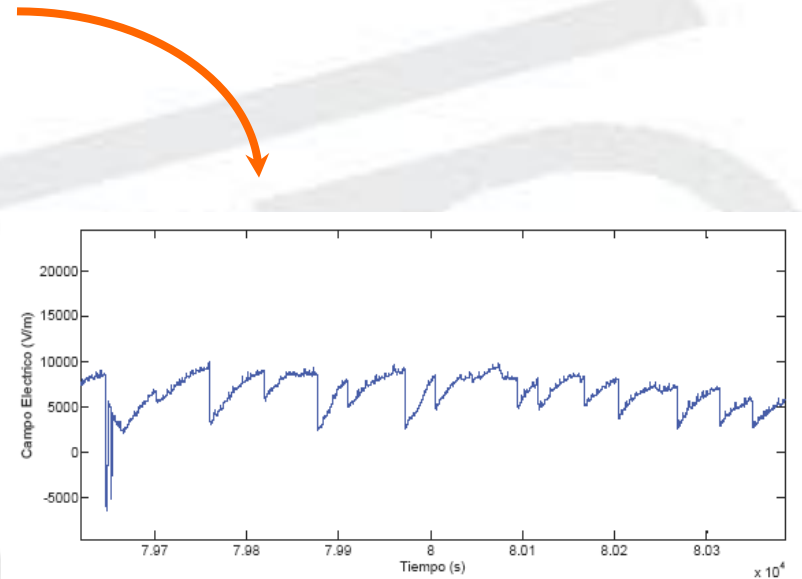


Figura 3.7 Variaciones de campo eléctrico medidas por los molinos de campo

Tensiones inducidas en MT (OE4)

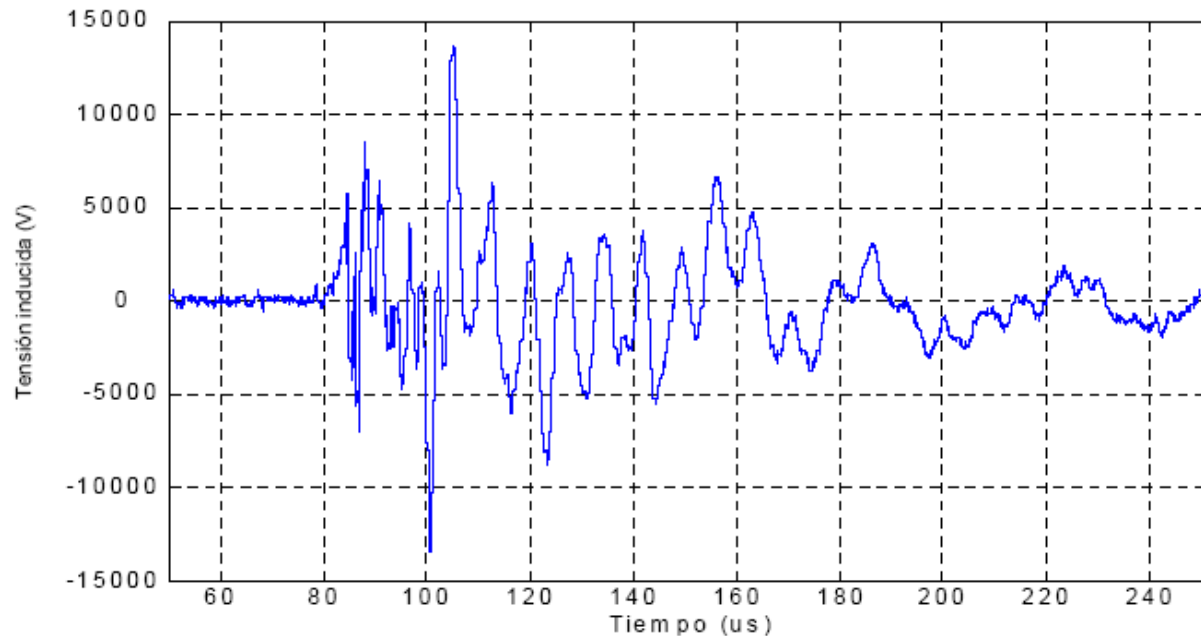


Tabla 3.2. Estadísticas de las tensiones inducidas medidas en media tensión

Variable	Media	Media SE	Desv. Est.	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
TI (V)	15484	1276	7967	9135	10622	13519	16309	52320
Duración (μ s)	939,8	71,5	446,3	97,7	621,6	824,6	1071,4	1905,3

Tensiones inducidas en BT (OE4)

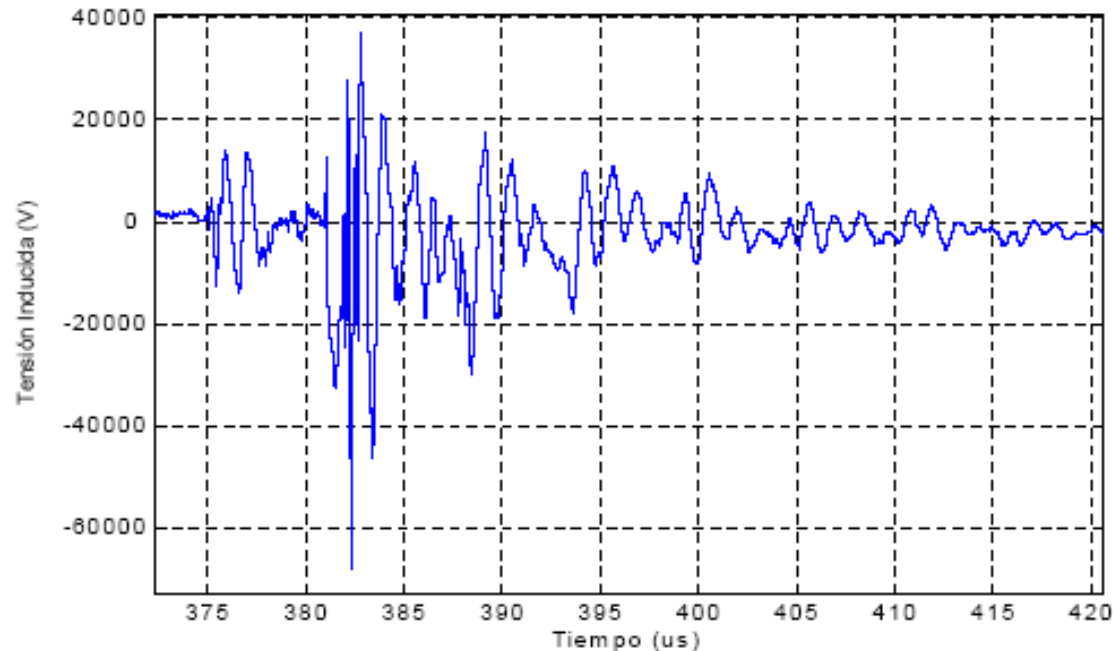
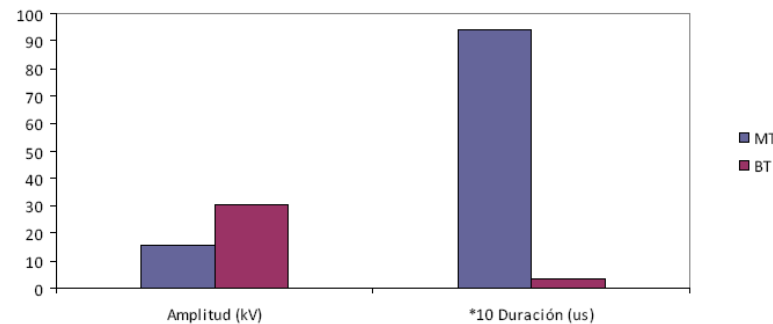


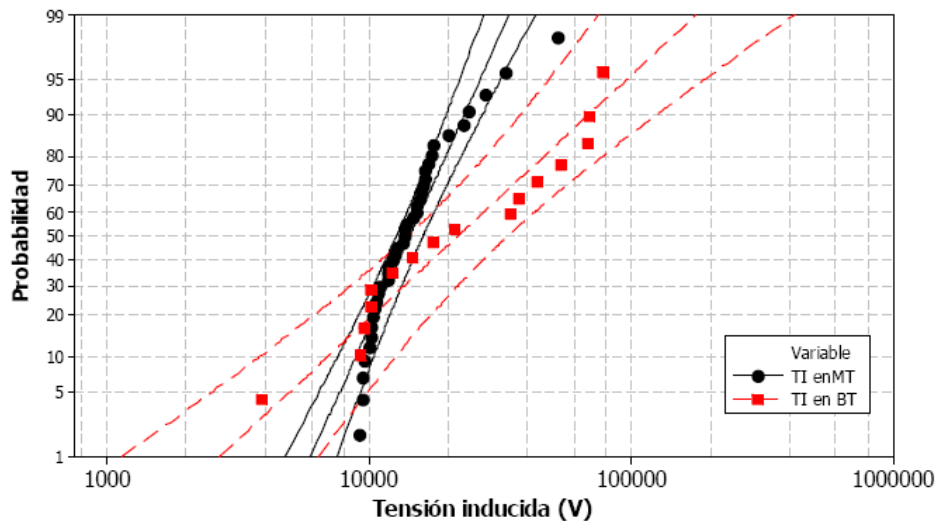
Tabla 3.3. Estadísticas de las tensiones inducidas medidas en baja tensión

Variable	Media	Media SE	Desv. Est.	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
TI (V)	30729	6170	24649	3902	10130	19238	50926	77670
Duración (μ s)	34,5	7,9	31,58	5,1	15	24,77	50,7	133

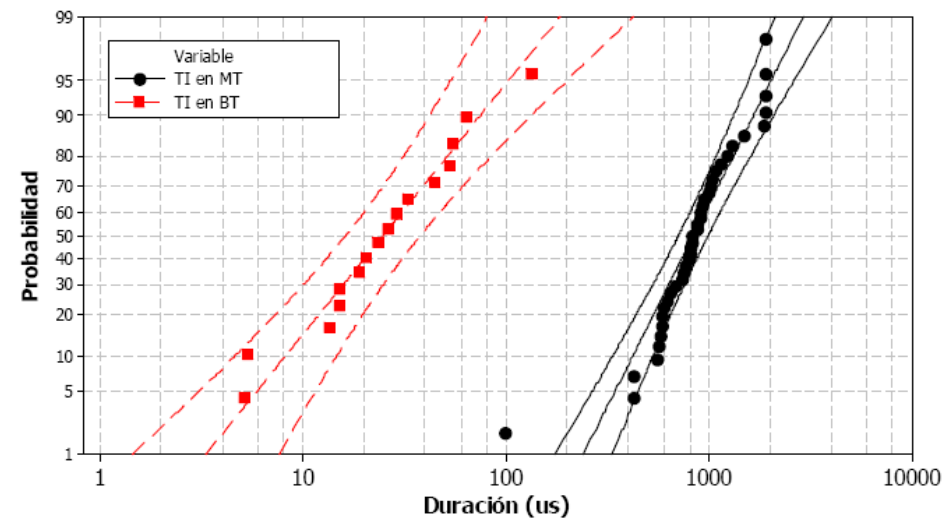
Comparación de TIs en MT y BT (OE4)



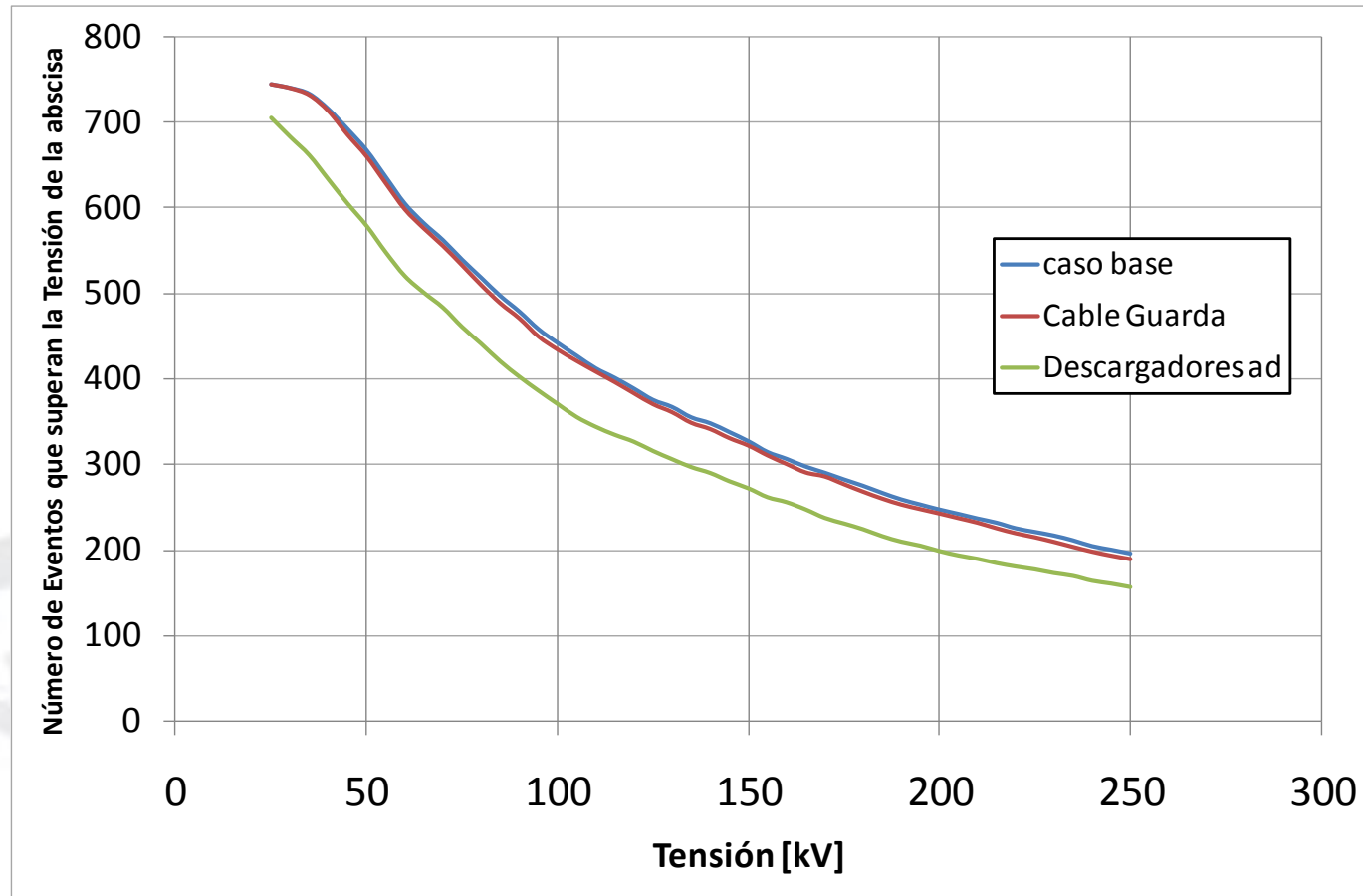
Curva de probabilidad para TIs en MT y BT
Lognormal - 95% CI



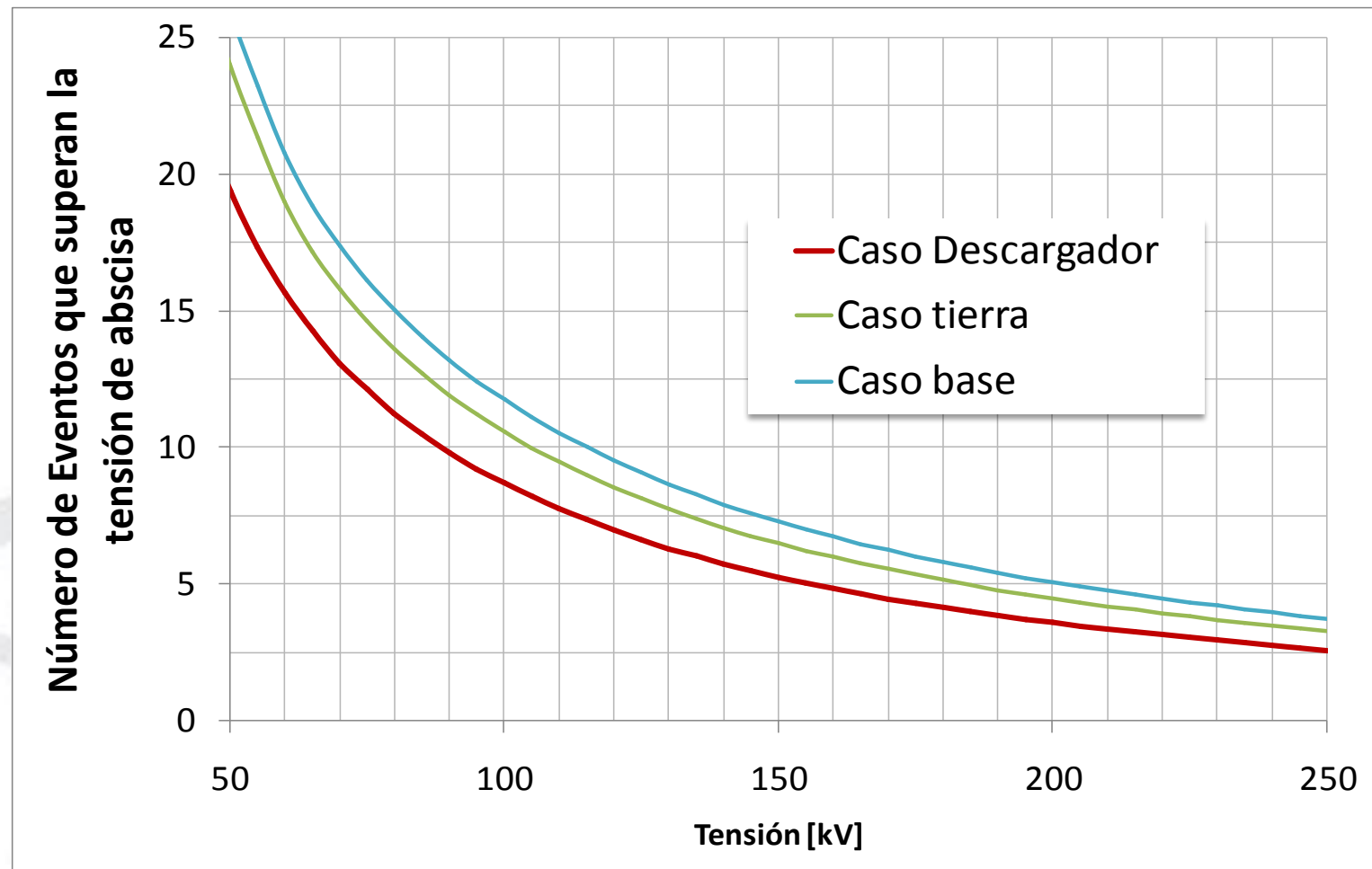
Curva de probabilidad de la duración de TI
Lognormal - 95% CI



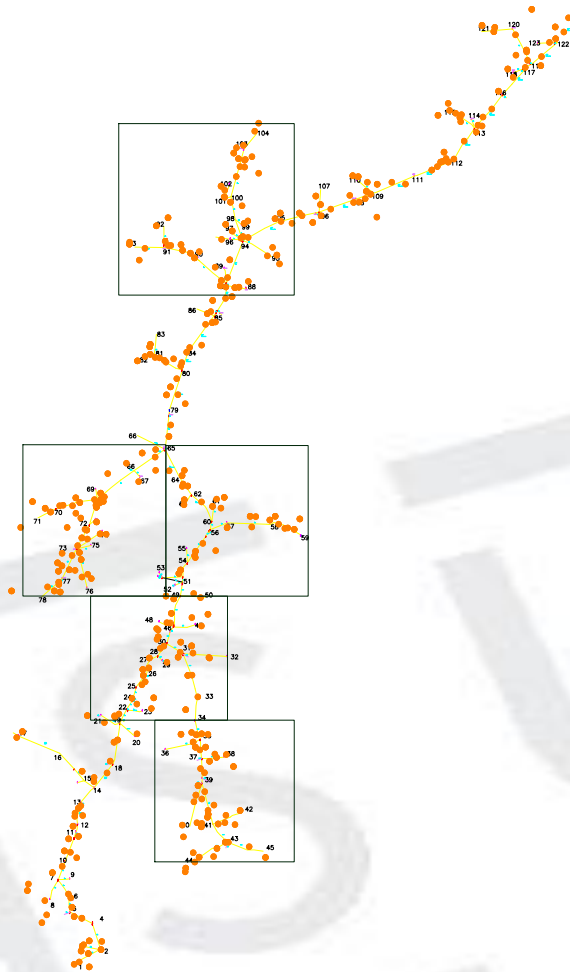
Número de Fallas /100 km año (OE4)



Solución: usando DST en la línea (OE4)



Zonas con mayor riesgo de impactos directos (OE4)



- 399 impactos directos en la línea
- 130 eventos con gran probabilidad de falla del aislamiento o de destrucción de un descargador de sobretensión.

Conclusiones del análisis (OE4,6)

Posibles soluciones obtenidas a partir de las simulaciones.

Teniendo en cuenta las simulaciones se puede identificar que dentro de las posibilidades, las alternativas más viables están:

1. Cable de guarda en el ramal principal, en los puntos de mayor altura, que tendrán mayor densidad de rayos (para disminuir los esfuerzos de los descargadores de sobretensión).
2. Incluir Descargadores de sobretensión en todos los finales de línea y nodos de intersección (posibilidad de mejoramiento del 20%)
3. Descargadores de sobretensión en baja tensión en los transformadores para disminuir el esfuerzo y aumentar la vida útil
4. Utilizar conductores en baja tensión trenzados para disminuir la inducción por rayos cercanos y disminuir las sobretensiones de transferencia en baja tensión.
5. Disminuir el valor de puesta a tierra en el punto de instalación del transformador.

Incidencias y fallas de transformadores (OE4)

-Incidencias

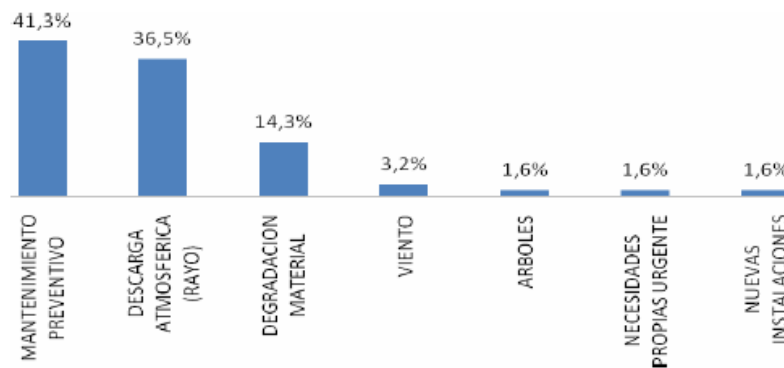


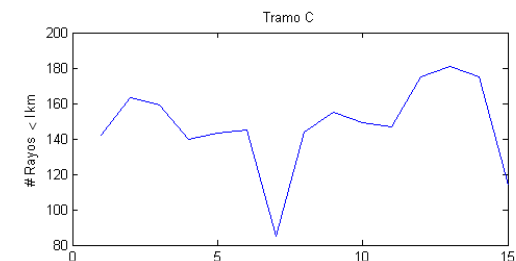
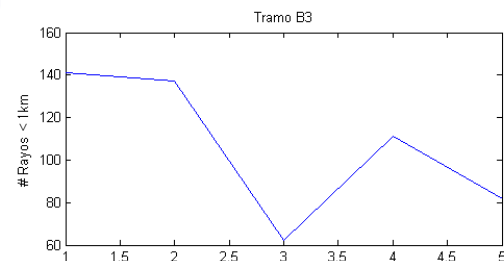
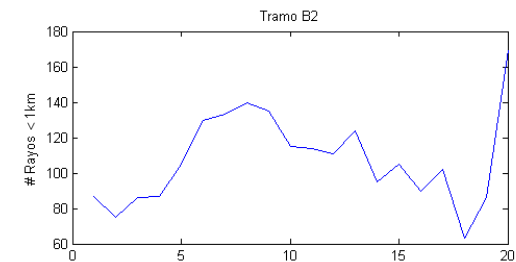
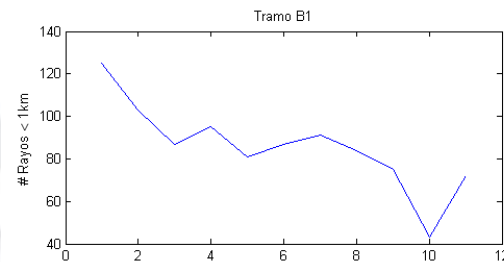
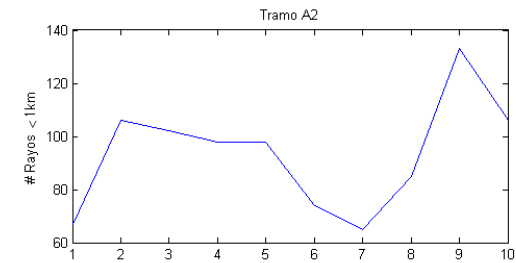
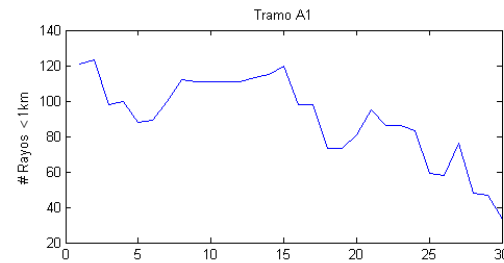
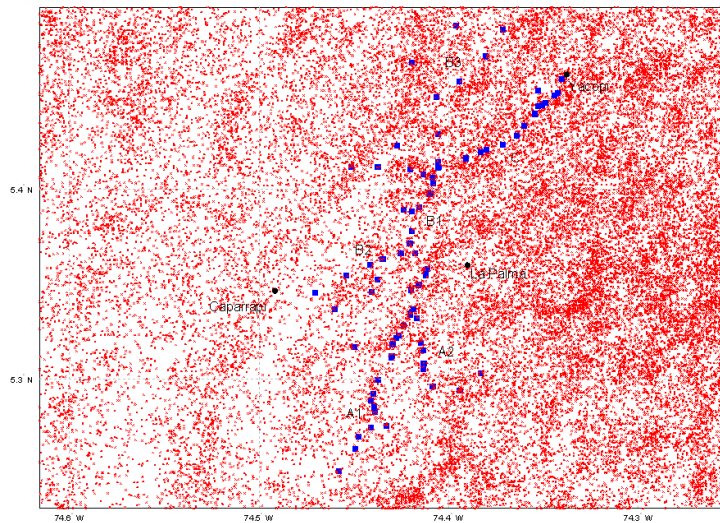
Figura 5.1 Causas de incidencias por porcentajes

Tabla 5.3 Causas de fallas de transformadores en el circuito Minipí

<i>Recurrencia</i>	<i>Cantidad de transformadores fallados</i>
Descarga Atmosférica	95
Quemado	12
Corto circuito en B.T	4
Falla en la fase	3
Vandalismo	1
Causa desconocida	1
Total	122

- Fallas de transformadores

Actividad de Rayos cercanos al Circuito Minipi (OE4)



Segmentos del circuito Minipi con mayor riesgo (OE4)

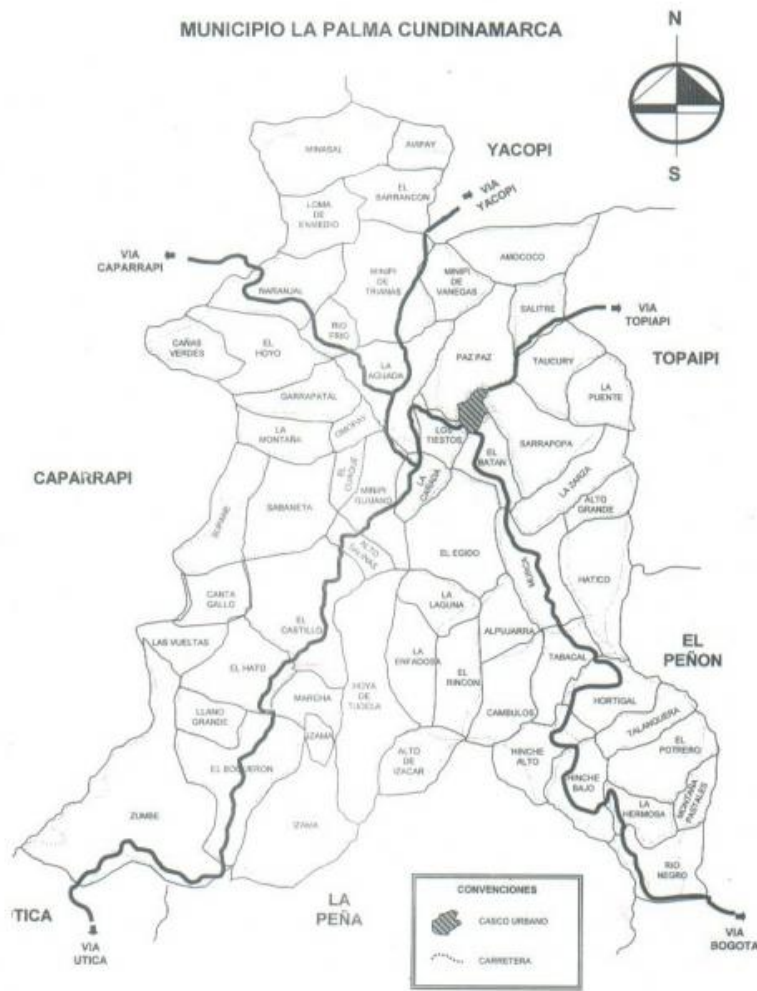


Tabla 4.2. Segmentos del circuito Minipi con mayor riesgo

Vereda o lugar	Número de impactos de rayos a tierra cercanos por km. (5 años)	Tramo
La Cañada	124	A1 y B1
Minipi de Quijano	120	A1
El Castillo	96	A1
El Egido	132	A2
La Aguada	125	B1, C
Minipi de Trianas	180	B1, C
Sabaneta	140	B2
Las Vueltas	168	B2
Loma de En medio	134	B3
Yacopi	162	C

Sistemas de puesta a tierra (OE4)

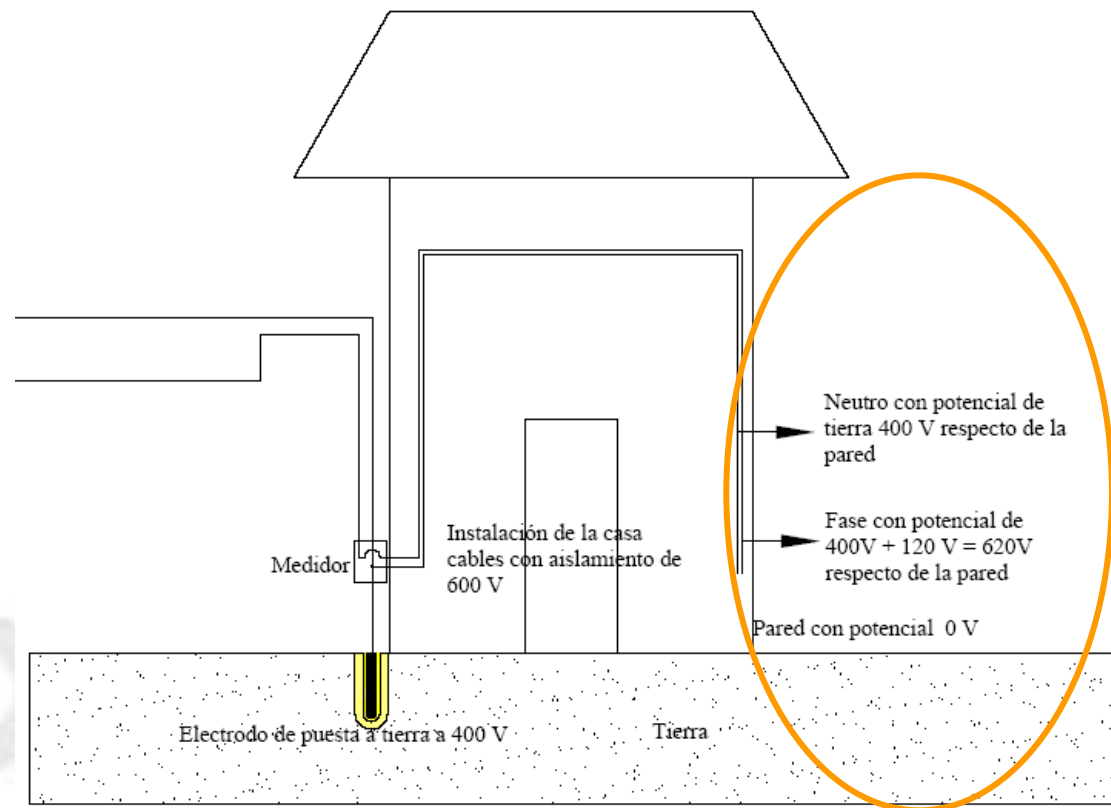
-Riesgos para personas e instalaciones

Transformador No. 17197 ubicado en la Vereda El Egidio	
No. de medida	Resistencia Ω
1	149.2

Transformador No. 17115 ubicado en la Vereda La Aguada	
No. de medida	Resistencia Ω
1	310.0

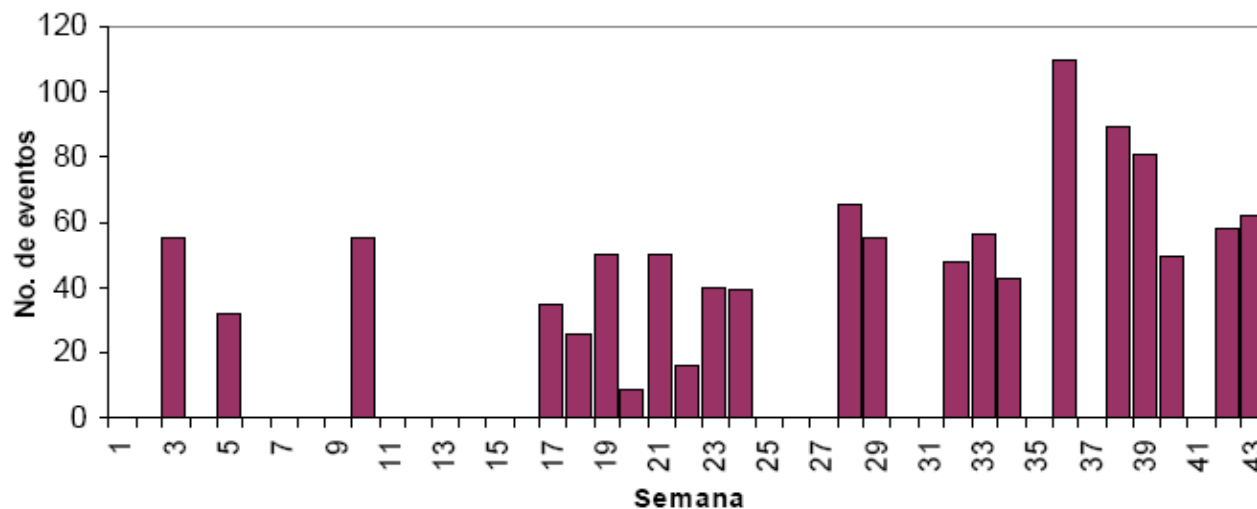
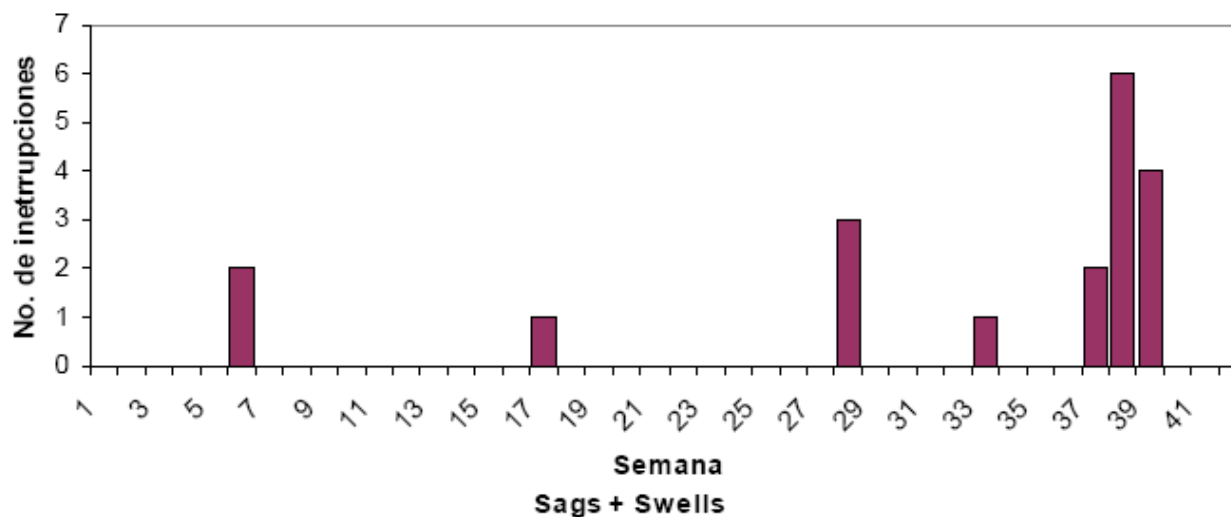
Transformador No. 17115 ubicado en la Vereda Cuesta en medio vía La Palma - Yacopí	
No. de medida	Resistencia Ω
1	36.2

Transformador No. 16889 ubicado en la Vereda La Cañada	
No. de medida	Resistencia Ω
1	129.1

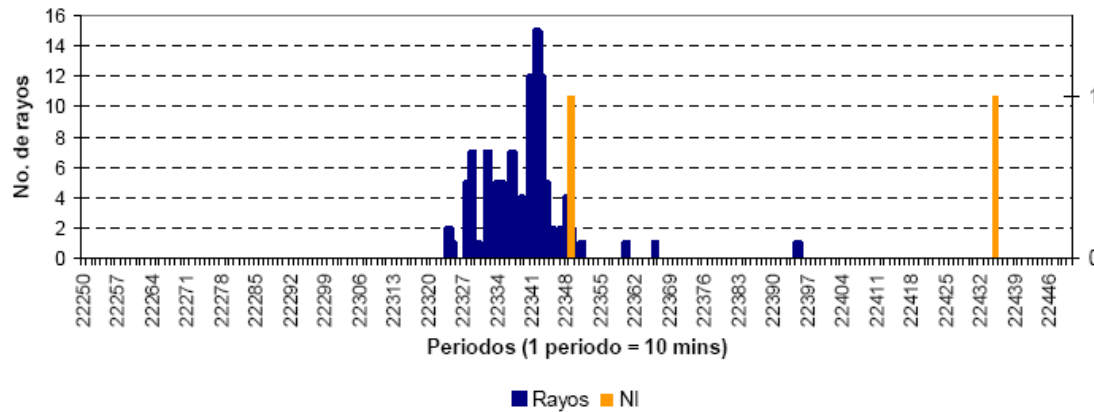
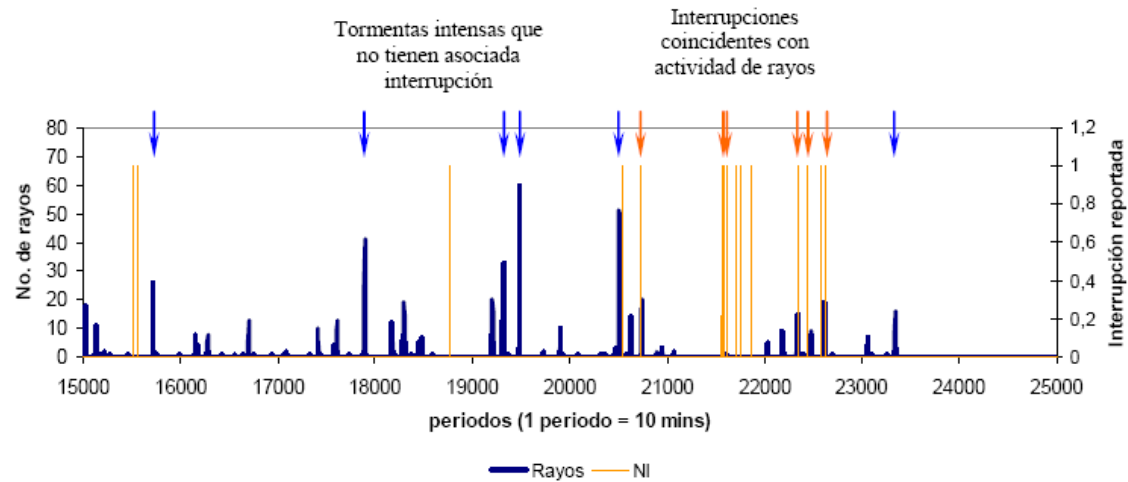


Interrupciones y eventos en tensión (2008-2009) (OE4)

Interrupciones reportadas

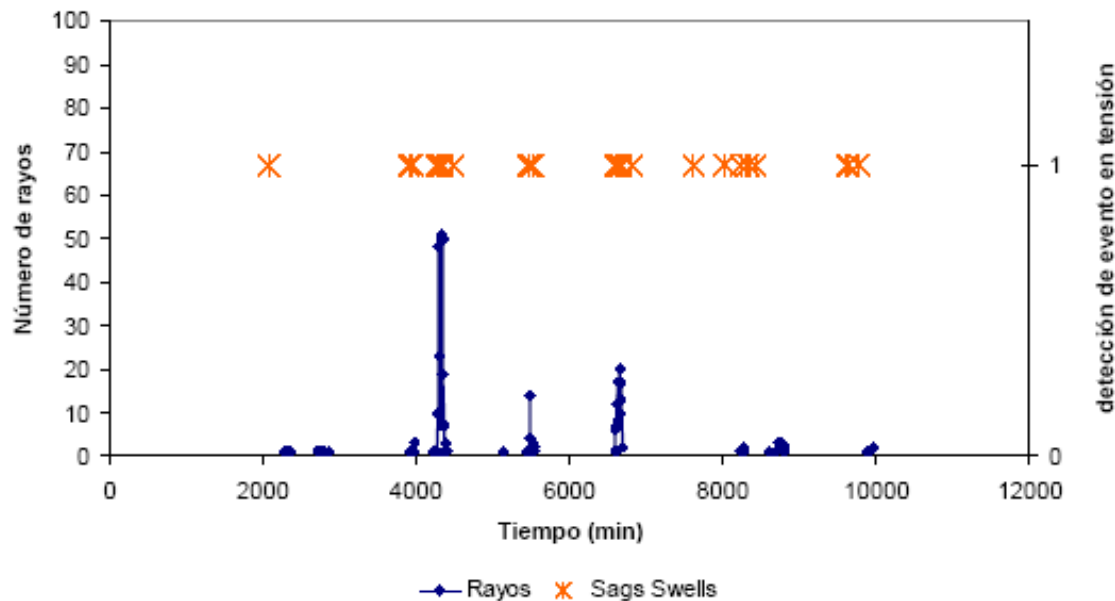


Interrupciones vs. Rayos (OE4)



Correspondencia del 50 % de los casos

Sags y swells vs rayos (OE4)



1124 Sags y Swells en 10 meses

Correspondencia en mas del 80 % de los casos con la actividad de rayos

Cuantificación de fallas (OE4, OE6)

1.3 Cuantificación total de fallas

La tasa total de falla del sistema en la condición actual es:

$$\text{Total fallas} = \text{inducidas} + \text{directas} = 168 + 120 = 288 \text{ fallas/100 km año} \quad (1)$$

Teniendo en cuenta ue el circuito tiene una longitud de 170,5 km, la tasa de fallas total es:

$$\text{Total fallas en el circuito} = 288 \text{ fallas/100 km año} \times 1,705 = \underline{489,6 \text{ fallas/año}} \quad (2)$$

Mejora de puestas a tierra (OE4, OE6)

Tabla 3. Efecto de mejorar puestas a tierra en la reducción de fallas por impactos directos de rayo

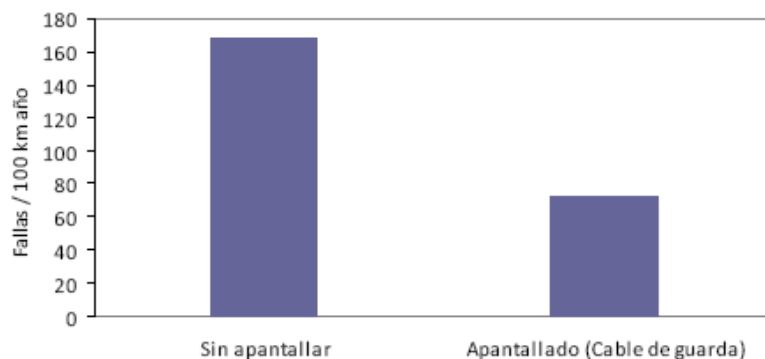
Solución	Puesta a tierra aproximada	Fallas / 100 km año (GFD = 1)	GFD La Palma	Fallas / 100 km año (La Palma)	Km de línea	Fallas en el Cto
Mejoramiento de puestas a tierra	>120 ohm	10	12	120	170,5	204,6
	100 ohm	9	12	108	170,5	184,1
	40 ohm	8	12	96	170,5	163,7
	20 ohm	5	12	60	170,5	102,3

Cable de guarda (OE4, OE6)

Tabla 1. Efecto de instalar cable de guarda en la reducción de fallas por tensiones inducidas

Solución	Caso	Fallas / 100 km año (DDT = 1)	DDT La Palma	Fallas / 100 km año (La Palma)	km de línea	Fallas en el cto
Apantallamiento	Sin apantallar	14	12	168	78	286,4
	Apantallado (Cable de guarda)	6	12	72	78	122,76

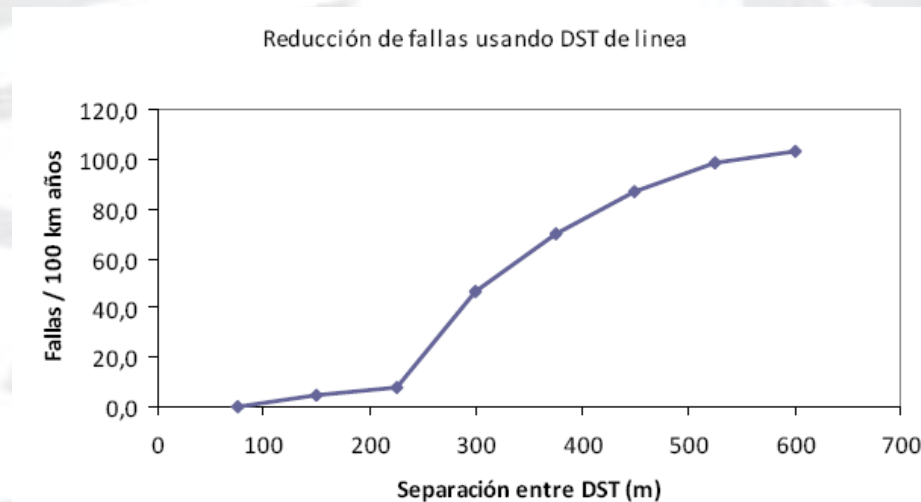
Reducción de fallas usando cable de guarda



Instalación de DST (OE4, OE6)

Tabla 2. Efecto de instalar DST de línea en la reducción de fallas por tensiones inducidas

Solución	Distancia entre DST (m)	Fallas / 100 km año (GFD = 1)	GFD La Palma	Fallas / 100 km año (La Palma)	km de línea	Fallas en el Cto
Uso de DST de línea	75	0,0	12	0,0	170,5	0,0
	150	0,4	12	4,7	170,5	8,0
	225	0,6	12	7,5	170,5	12,7
	300	3,9	12	46,7	170,5	79,6
	375	5,8	12	70,0	170,5	119,4
	450	7,2	12	86,8	170,5	148,0
	525	8,2	12	98,0	170,5	167,1
	600	8,6	12	102,7	170,5	175,0
	Sin DST de línea	14,0	12	168,0	170,5	286,4



Implementación de soluciones

(OE4, OE6)

Algunas metodologías de solución que son efectivas son:

1. Cable de guarda disminuye el acople de producido por el campo electromagnético su eficiencia se da principalmente en el aterrizamiento que se de a este cable, mientras más puntos estén a conectado a tierra mejor.
2. Descargadores de sobretensión a lo largo de la línea, su eficacia esta asociado al número de descargadores que se usen
3. Disminución de distancias entre conductores
4. Mejoramiento de Transformadores
5. Aumento del CFO del aislamiento de la línea de distribución.

Implementación de soluciones

(OE4, OE6)

Tabla A. Características de los tramos del Circuito Minipí

Tramo	Longitud (km)	No. de fallas/año	No. de fallas de transformadores	No. de rayos a menos de 1 km
B3	26.7	77	28	140
A1	32.9	95	24	122
A2	22.2	64	21	135
C	31.6	91	16	180
B2	21.3	61	13	160
B1	16.5	48	12	122

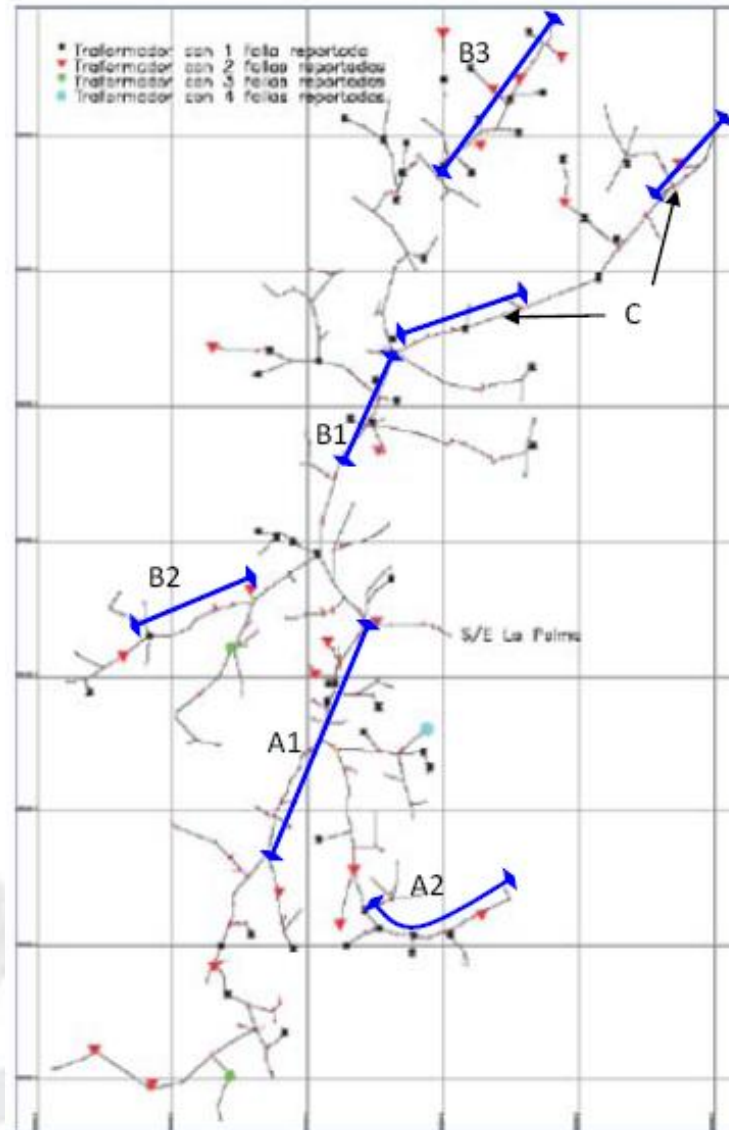
Tabla B. Implementación de soluciones por cada tramo del circuito Minipí.

Prioridad	Tramo	Longitud (km)	Sección a intervenir (km)	Vereda, lugar	Cable de Guarda (km)	No. DST (Cada 450m)	Mejoramiento de puestas a tierra
1	A1	32.9	14,9	La Cañada - Minipi de T.- El Castillo	14,9	33	40 Ω .
2	B3	26.7	14	Loma en Medio	14	31	40 Ω .
3	A2	22.2	11	El Egido	11	24	40 Ω .
4	C	31.6	14,6	Via a Yacopi	14,6	32	40 Ω .
5	B2	21.3	8,9	Sabaneta	8,9	20	40 Ω .
6	B1	16.5	4,1	La Aguada	4,1	9	40 Ω .
Total	--	151,2	67,5	----	67,5	150	----

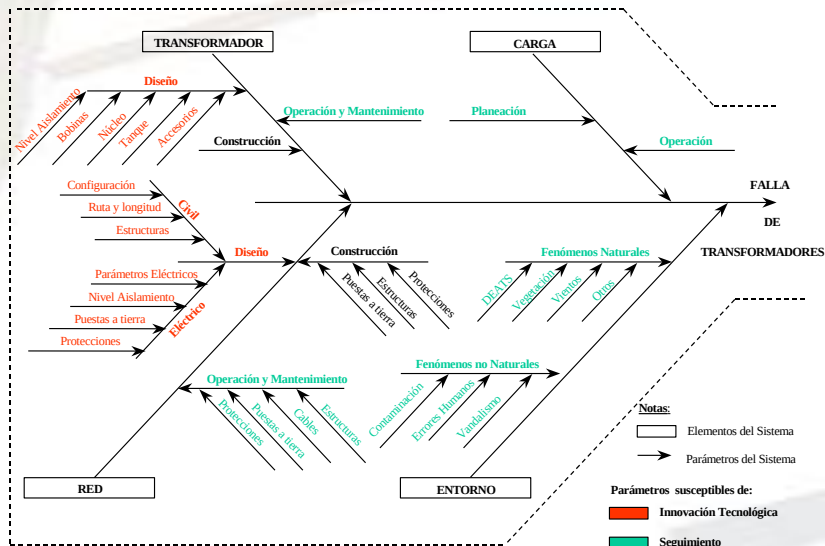
Implementación de soluciones

(OE4, OE6)

-Secciones para
aplicar
soluciones



Soluciones – Mejoramiento de transformadores (OE4, OE6)



1. Incremento del BIL del transformador: 125/30 kV
2. Diseño de bobina de Alta tensión contra núcleo
3. Descargadores en AT y BT, o Autoprotección (CSP), protecciones adicionales en red si es necesario
4. Pruebas de vacío y hermeticidad en fábrica (0,2 atmósferas) para evitar burbujas (combinación de dieléctricos) durante el transporte.
5. Puestas a tierra de bajo valor ohmico (< 20 Ohmios).
6. Monitoreo y Mantenimiento permanente del sistema - entorno (Red, protecciones, transformador, puestas a Tierra, vegetación).
7. Si el sitio es de difícil acceso se recomienda modificación de los soportes mecánicos para transporte.

Protección de equipos en baja tensión (OE5)

De acuerdo a las simulaciones realizadas en el capítulo 3 para impactos directos e indirectos, es posible observar que las sobretensiones a las que se encuentra sometido el lado de baja tensión de los transformadores por tensiones transferidas, puede ser mayor a 35 kV, comprometiendo el aislamiento en baja tensión del transformador.

Esto se corrobora con las mediciones realizadas en el circuito, en las cuales se encontró que las sobretensiones transferidas podrían llegar a valores de 77 kV.

Una forma para reducir el riesgo de falla del transformador es implementar dispositivos de protección como descargadores de sobretensión en baja tensión. La tensión residual de estos dispositivos para el nivel de tensión 120-220 V es típicamente de 4-5 kV

Mejoramiento del desempeño de RD

☐ *Técnicas comunes*

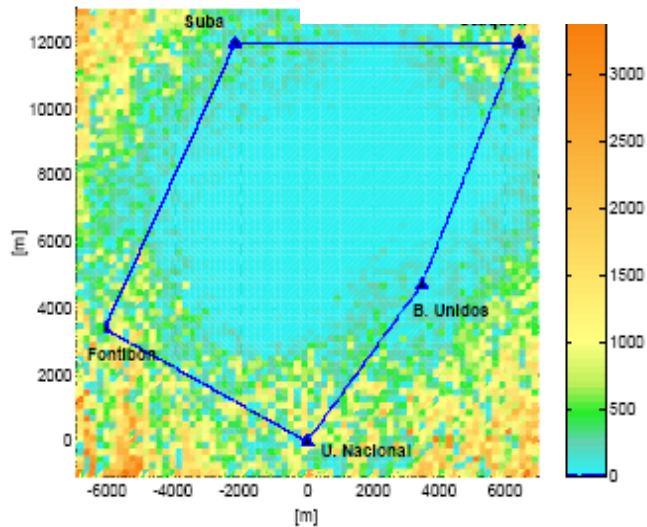
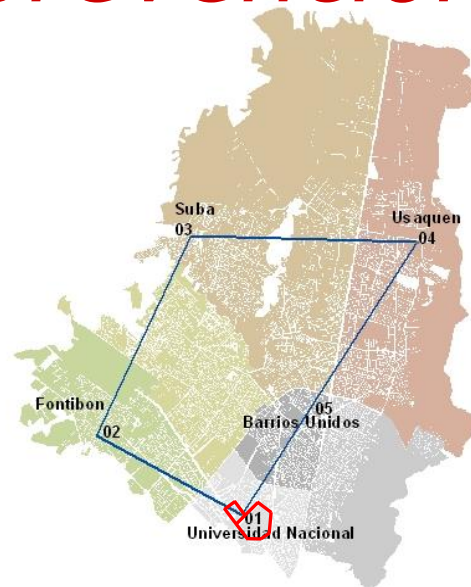
- ☐ *Reducción de la Resistencia de Puesta a Tierra*
- ☐ *Aumento del nivel de aislamiento de RD*

☐ *Otras prácticas: Mejoramiento integral:*

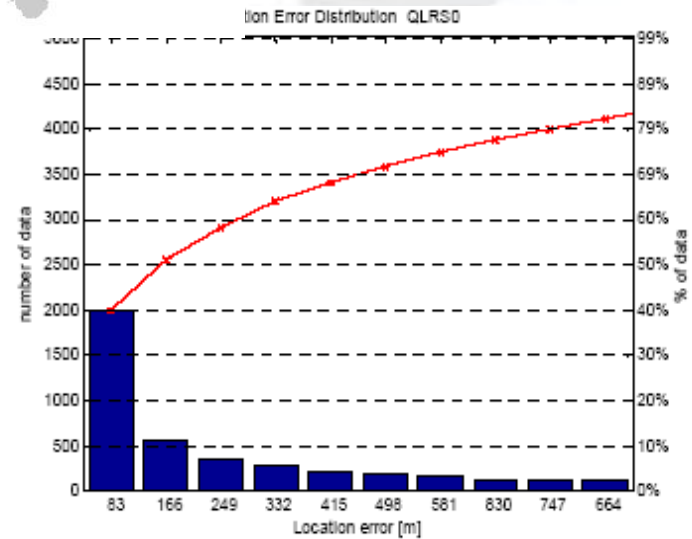
- ☐ *Trafos nuevo diseño (8 factores)*
- ☐ *Reducción de la Altura de la Torre*
- ☐ *Cables de guarda adicionales (mejora acople)*
- ☐ *Uso de madera o fibra de vidrio en serie con el aislador (aumenta el CFO y ayuda a extinguir el arco)*
- ☐ *Apantallamiento adicional con estructuras vecinas (árboles, torres, edificios, RD)*
- ☐ *Instalar contrapesos (Reduce RPT)*
- ☐ *Uso de descargadores de ST en paralelo con aisladores.*

3. Perspectivas

Sistema de prevención.



(a)



(b)

Figure 5. Location error when it is used the Q model for the total leader and return stroke process. (a) Location error map. (b) Location error distribution.

Conceptos básicos sobre predicción y alerta de tormentas eléctricas

Sistema de Alerta de Tormentas – SAT (*Thunderstorm Warning System - TWS*)

Sistema compuesto por **detectores** de tormentas y **algoritmos**, capaz de seguir la actividad de tormentas en un área de monitoreo y procesar alertas válidas relacionadas con eventos de rayo para un objetivo a proteger específico.

EN50536 Protection Against Lightning – Thunderstorm Warning Systems CENELEC 2011.

El sistema de Alerta de Tormentas – SAT más básico

Detector:

- Ojo
- Oído

Algoritmo: **(Regla del 30 / 30)**

- Si t (entre el relámpago y el trueno) < **30 segundos** → (encender alarma)
- Si t (después del último trueno) > **30 minutos** → (fin de alarma)

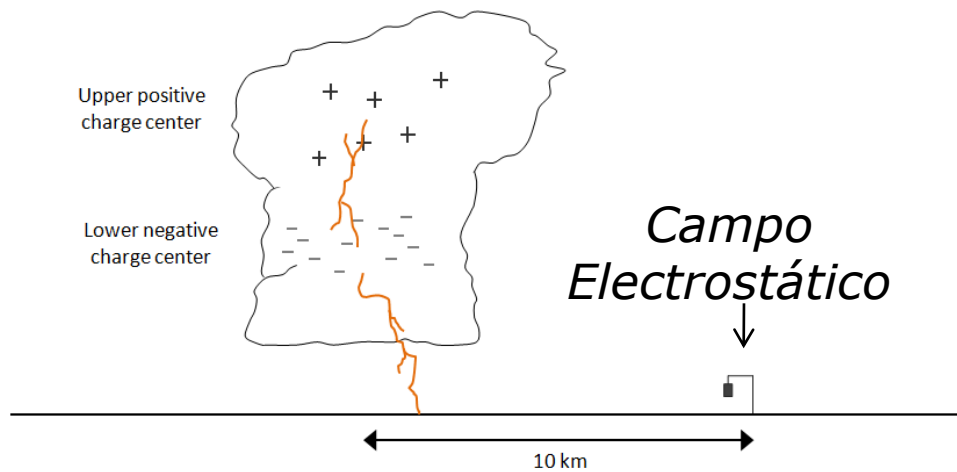


Métodos de detección

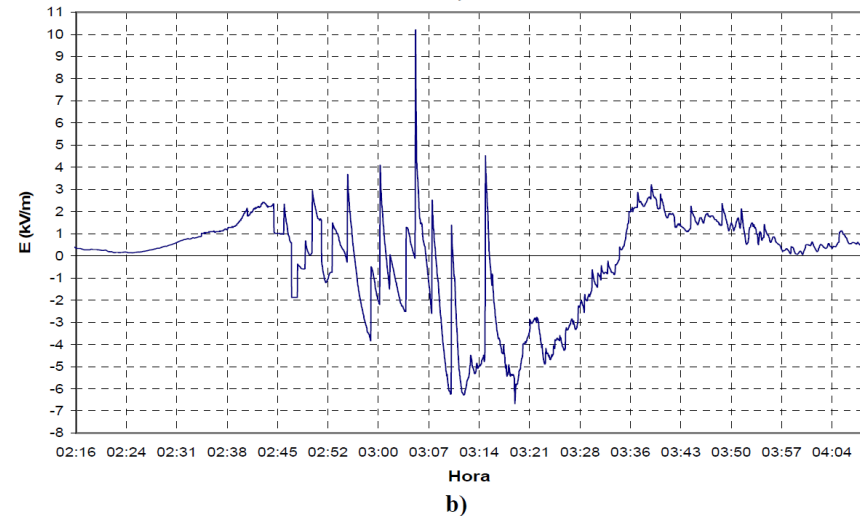
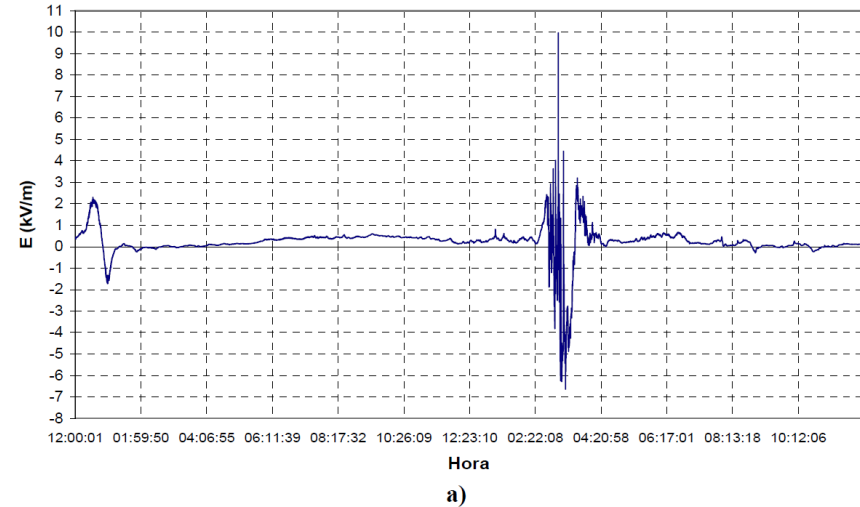


- Medida del campo electrostático (DC)
- Medida de los campos electromagnéticos asociados a la descarga (VLF, LF, VHF)
- Radar Meteorológico (Reflectividad)
- Sistemas satelitales (LIS-NASA, ASIM-ESA)

Medida del campo electrostático (DC)



- Tiempos de predicción (*Lead-time*) entre 10 y 30 minutos
- Probabilidad de Detección (*POD*) mayor a 95 %
- Rango 20 – 30 km



Medida del campo electrostático (DC)



Medida de los campos electromagnéticos asociados a la descarga (VLF, LF, VHF)



Clasificación de los métodos de detección

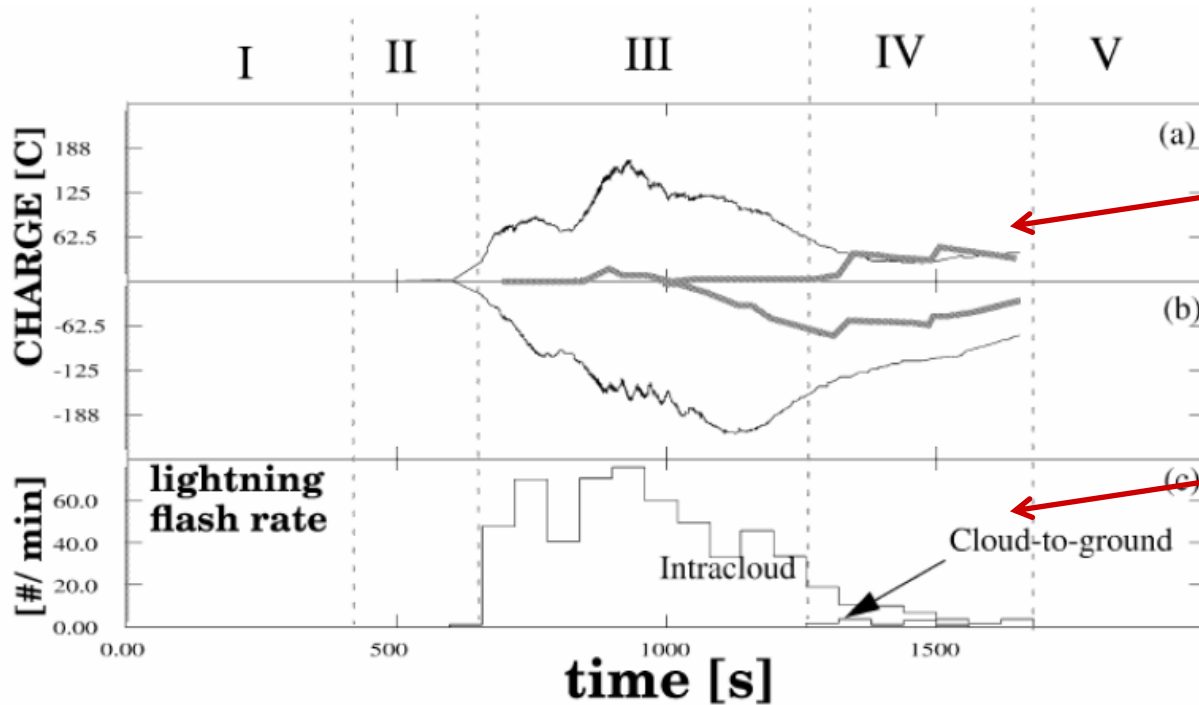
- **CLASE I.** Detección de la tormenta en todo su ciclo de vida (Molinos de campo eléctrico)
 - **PRETHOR**, PREVISTORM, MISSION INSTRUMENT, CAMPBELL, otros
- **CLASE II.** Detección de actividad total de rayos (redes de detección).
 - **LINET (3D)**, SAFIR, LMA, LDAR
- **CLASE III.** Detección de actividad de rayos nube-tierra (redes de detección).
 - **IMPACT**
- **CLASE IV.** Detección de radiaciones con eficiencia muy limitada.
 - **Sensores portátiles**

Algoritmos de predicción



- Procesamiento de campo electrostático
- Detección y seguimiento de celdas de tormentas

Ciclo de vida de la nube de tormenta



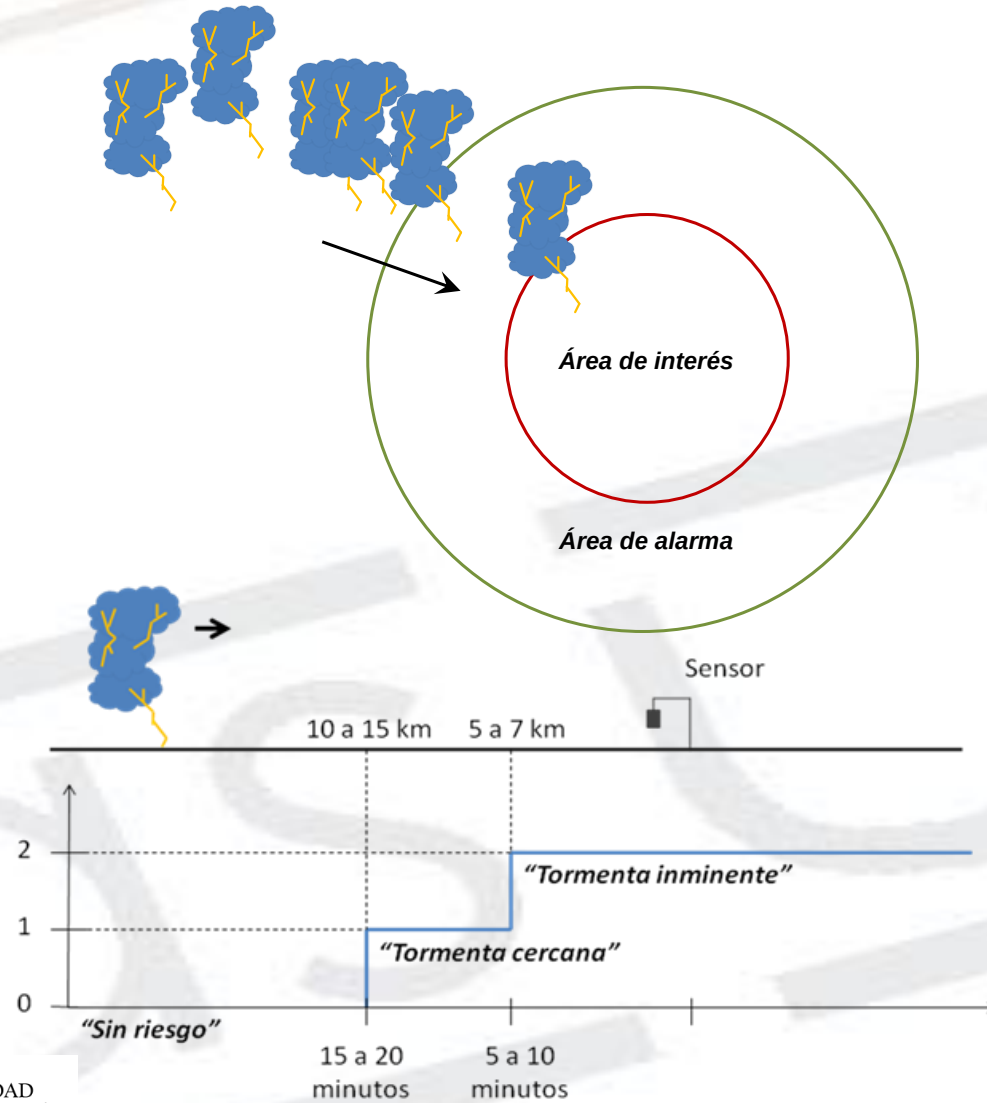
Clase I



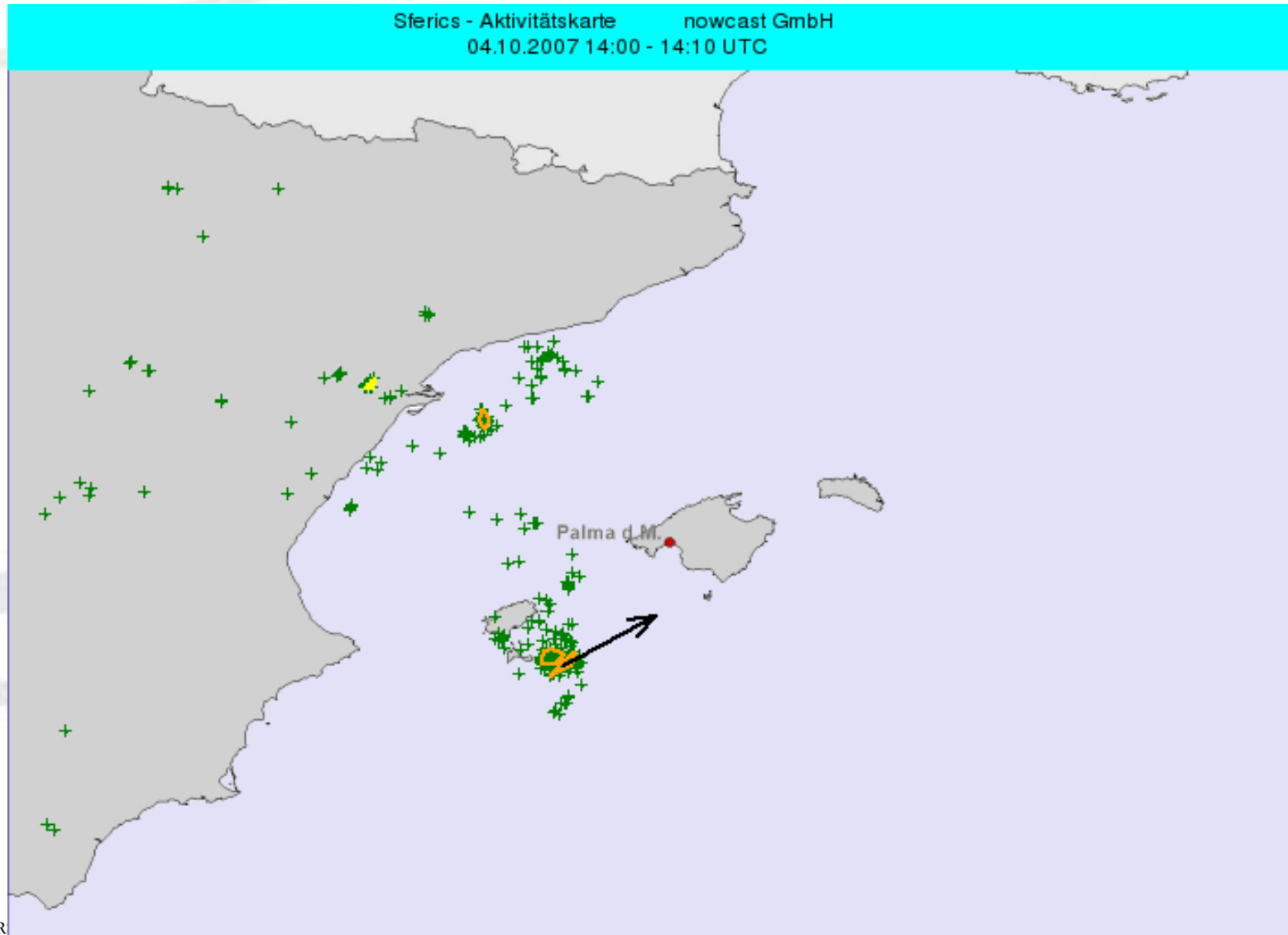
Clase II



Procesamiento de campo electrostático



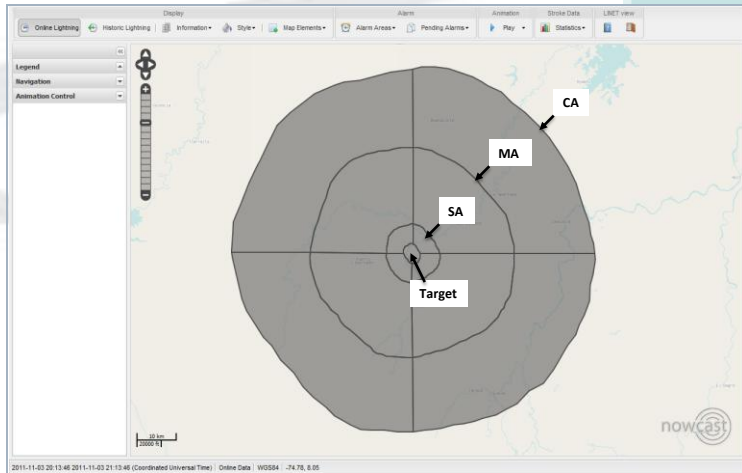
Seguimiento de celdas de tormenta



➤ *CASOS REALES DE APLICACIÓN*

- *MINAS*
- *CAMPOS PETROLEROS*
- *AEROPUERTOS*
- *REDES DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA*
- *TORRES DE COMUNICACIONES*

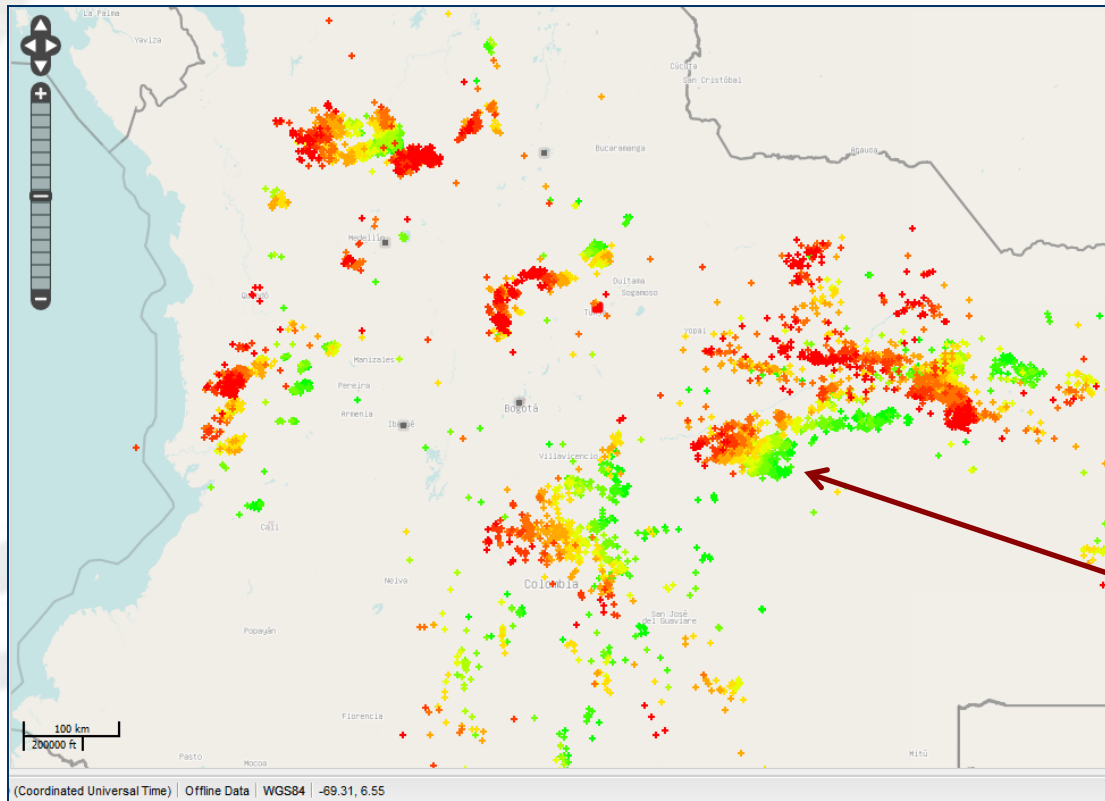
Minas, Colombia,



Minas, Colombia,



Campo Petrolero, Colombia,



Campo Petrolero, Colombia,



Campo Petrolero, Colombia,



Sensor RB-4



Sensor CPF-1



Sensor Arrayanes

1. ARRAYANES

2. CPF1

3. CPF2

4. AEROPUERTO

5. ESCUELA

6. BATERIA 4

Sensor CPF-2



Sensor Morelia



Sensor escuela

Campo Petrolero, Colombia,

Nivel Medio Alarma Sensor Aeropuerto Morelia(Estado de Inicio)

Inbox x



FEBRERO DE 2011



satrubiales@keraunos.co

Mar 3 (3 days ago) ☆



to contacto, opaereo, hsupervisor, djurado, hseqcpf1, me, hseqcpf2, oradio, dcorredor, czambrano, miramirez, cfranco

El nivel de alarma del sensor ha pasado a medio. Tormenta eléctrica en formación, tome las medidas preventivas en el área de cobertura

Nivel Alto Alarma Sensor Aeropuerto Morelia(Estado de Madurez)

Inbox x



satrubiales@keraunos.co

Mar 3 (3 days ago) ☆



to contacto, opaereo, hsupervisor, djurado, hseqcpf1, me, hseqcpf2, oradio, dcorredor, czambrano, miramirez, cfranco

El nivel de alarma del sensor ha pasado a alto. Riesgo inminente de actividad de rayos, tome las medidas preventivas en el área de cobertura

ARRAYANES, 15 DE FEBRERO DE 2011

Nivel Medio Alarma Sensor Aeropuerto Morelia(Estado de Disipación)

Inbox x



satrubiales@keraunos.co

Mar 3 (3 days ago) ☆



to contacto, opaereo, hsupervisor, djurado, hseqcpf1, me, hseqcpf2, oradio, dcorredor, czambrano, miramirez, cfranco

El nivel de alarma del sensor ha pasado a medio. Tormenta eléctrica en formación, tome las medidas preventivas en el área de cobertura

Nivel Estable Alarma Sensor Aeropuerto Morelia(Estado de Balance)

Inbox x



satrubiales@keraunos.co

Mar 3 (3 days ago) ☆



to contacto, opaereo, hsupervisor, djurado, hseqcpf1, me, hseqcpf2, oradio, dcorredor, czambrano, miramirez, cfranco

El nivel de alarma del sensor ha pasado a nivel estable. Sin riesgo de actividad de rayos



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Tiempo (s)

00:00:00

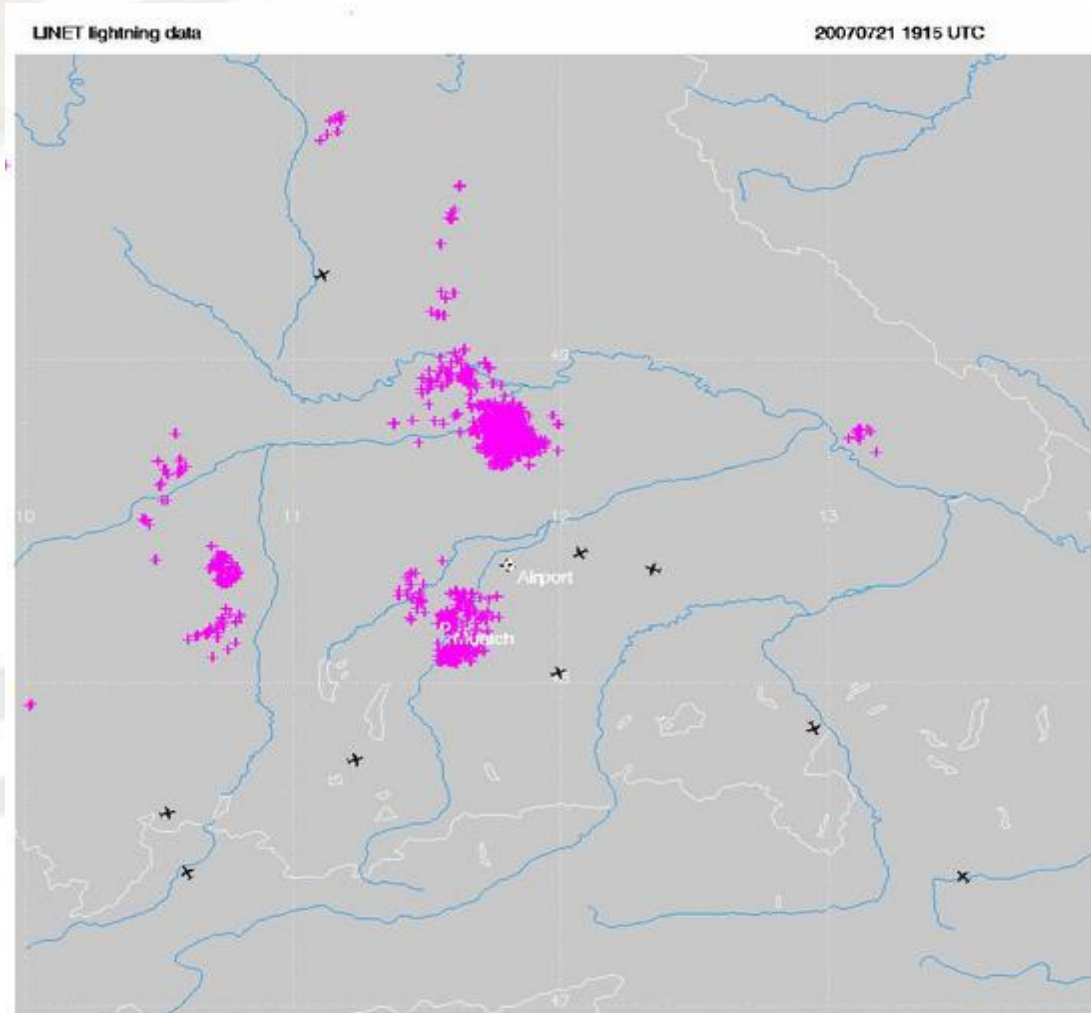
Aeropuertos



Aeropuertos



Aeropuertos



Conclusiones (1/2)

- Respecto a los rayos hay consenso mundial que **NO EXISTEN** ni medios para evitarlos ni sistemas de protección 100% eficaces.
- Sin embargo, **EXISTEN MEDIDAS** (plasmadas en resultados de investigación, normas, reglamentos y documentos especializados) para mitigar los riesgos, cuya efectividad depende de las instituciones en exigirlas y la actitud de las personas para cumplirlas.
- Los circuitos piloto experimentales de Guachipay (Cundinamarca) y Samaná (Caldas) localizados en una de las dos zonas de mayor actividad de rayos en Colombia, muestran resultados promisorios para la solución al problema de falla de transformadores de distribución en Colombia.

Conclusiones (2/2)

- ❑ *Por ejemplo, para el Circuito Piloto Experimental de Guachipay, luego de instalados los transformadores Prototipo Nuevo Diseño, la rata de fallas pasó del 50% para el periodo 1990 - 1997, a 0% en el año 1998, 7% en 1999 y 0% en 2000.*
- ❑ *Para el circuito de Samana se pasó de 42 trafos fallados anualmente en promedio antes del año 2001 a 5 trafos fallados entre 2001 y 2005.*

En toda actividad de Ciencia y Tecnología es demostrable que no hay verdades absolutas sino certezas temporales. Un ejemplo de ello han sido los parámetros del rayo medidos por Berger entre la década de 1950 y 1970, que han servido como base para el desarrollo de las grandes investigaciones de rayos en el mundo y en normalización internacional, que hoy son cuestionados con rigurosidad por mediciones directas de parámetros del rayo¹ en la misma zona templada donde fueron medidos hace 50 años y por mediciones en zona tropical^{2,3,4}.

¹ Diendorfer et. al. "Statistical of lightning current parameters measurement at the Geisberg Tower", ILDC, 2004, Ref 64.

² F. de la Rosa, K. Cummins, L. Deller, G. Diendorfer, A. Galván, J. Husse, V. Larsen, C.A. Nucci, F. Rachidi, V. Rakov, H. Torres and M.A. Uman. "Characterization of lightning for applications in Electric Power Systems" Journal Electra - Technical Brochure No. 172, CIGRE WG. 33.01.02, December 2000.

³ Visacro, S. et.al "Statistical analysis of lightning current parameters: Measurements at Morro do Cachimbo station" Journal of Geophysical Research JGR, Vol. 109, D01105. 2004.

⁴ Torres, H. "El Rayo", Ed. Unibiblos, 2002