

## **2.3 Teoría microscópica de la resistencia**

**Seguridad eléctrica**

**Aplicaciones:**

**Física de las descargas  
atmosféricas**



# Teoría microscópica de la resistencia

Modelo clásico de conducción eléctrica en metales (1900, Paul Drude): conduce a ley de Ohm resistividad en metales relacionada con movimiento de electrones.

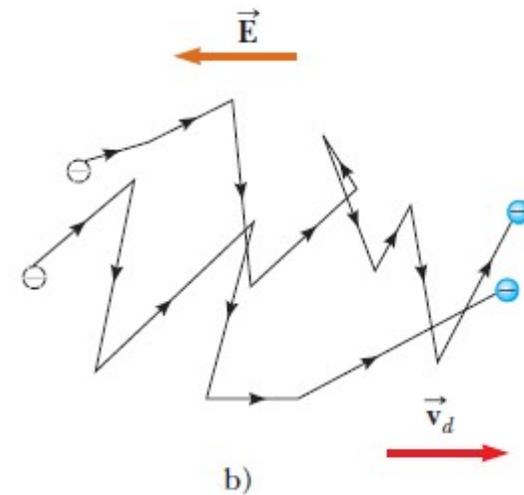
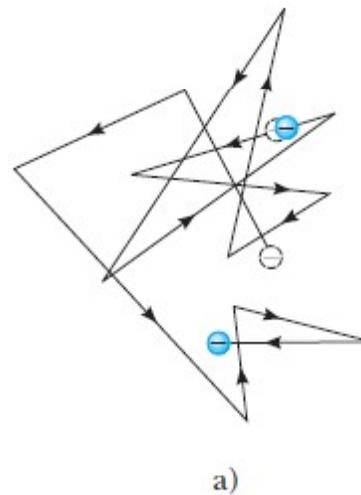
**Conductor:** arreglo de átomos normales más conjunto de electrones libres (**electrones de conducción**).

Estos electrones están unidos a sus átomos respectivos cuando éstos no forman parte de un sólido, pero obtienen movilidad cuando estos átomos forman un sólido.

Sin un campo eléctrico los electrones de conducción se mueven al azar a través del conductor con una

**velocidad térmica media ( $u$ )** (promedio del orden de  $10^6$  m/s, similar a lo que sería un gas de electrones).

La rapidez de arrastre  $v_d$  es del orden de  $10^{-4}$  m/s.



**Recorrido libre medio ( $\lambda$ ):** distancia media que recorre un electrón entre las colisiones que experimenta con los iones del conductor.

# Teoría microscópica de la resistencia

Al aplicarse un  $E$ , los electrones libres se desplazan lentamente en sentido una dirección opuesta al  $E$ , con una **rapidez de arrastre  $v_d$**  (típicamente  $10^{-4}$  m/s). Suposiciones:

1. Movimiento del electrón después de una colisión es independiente de su movimiento antes de la colisión.
2. Energía adquirida en exceso por los electrones en el  $E$  se pierde en los átomos del conductor cuando chocan. La energía proporcionada a los átomos aumenta su energía vibratoria, lo que hace que la temperatura del conductor aumente.

Electrón libre masa  $m_e$  y carga  $q = (-e)$  bajo acción de un  $E$  constante, experimenta una fuerza  $\mathbf{F} = q\mathbf{E}$ . Al aplicar la segunda ley de Newton,

$$\bar{a} = \frac{qE}{m_e}$$

$v_i$  velocidad inicial del electrón en el instante posterior a una colisión

$$\bar{v}_f = \bar{v}_i + \bar{a}t = \bar{v}_i + \frac{qE}{m_e} t$$

# Teoría microscópica de la resistencia

Valor promedio de  $\mathbf{v}_f$  (para todos los posibles tiempos entre colisiones  $t$  y todos los posibles valores de  $\mathbf{v}_i$  de los electrones): valor promedio de  $\mathbf{v}_i$  es cero (se supone que las velocidades iniciales están distribuidas aleatoriamente sobre todos los posibles valores); valor promedio de 2do. término es  $(q\mathbf{E}/m_e)\tau$ , con  $\tau$  *intervalo de tiempo promedio entre colisiones sucesivas*.

Pero el valor promedio de  $\mathbf{v}_f$  es igual a la velocidad de arrastre:

$$\bar{\mathbf{v}}_{f \text{ prom}} = \bar{\mathbf{v}}_d = \frac{q\mathbf{E}}{m_e} \tau$$

Relacionando  $v_d$  con la densidad de corriente  $J$   $J = nqv_d = \frac{nq^2E}{m_e} \tau$

De acuerdo a la ley de Ohm,  $J = \sigma E$ , se obtienen las siguientes correspondencias para conductividad y resistividad de un conductor:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{nq^2}{m_e} \tau$$

Según este modelo ni conductividad ni resistividad dependen de la intensidad del E.

**Característica de un conductor que obedece la ley de Ohm.**

# Teoría microscópica de la resistencia

Se pueden obtener expresiones similares usando el **recorrido libre medio**  $\lambda$  y la **velocidad térmica**  $u$ , en lugar del  $\tau$  (tiempo medio entre choques). Cada vez que un electrón choca con un ion, se desvía al azar y pierde la tendencia a moverse según la fuerza eléctrica que experimenta. Su próximo choque se produce al cabo de un tiempo que satisface:  $\tau = \lambda/u$ .

$$\rho = \frac{m_e}{nq^2\tau} = \frac{m_e u}{nq^2\lambda}$$

$n$  y  $\lambda$  dependen del material, la velocidad térmica  $u$  depende de la temperatura.

$\lambda$ , es del orden de 100 veces la distancia interatómica: los electrones viajan a través de la red cristalina del conductor de forma totalmente libre y no chocan hasta que se encuentran con una desviación de la estructura regular de la red: que puede ser una impureza o un ion de la red algo desplazado de su posición de equilibrio debido a su movimiento vibratorio térmico.

# Seguridad Eléctrica

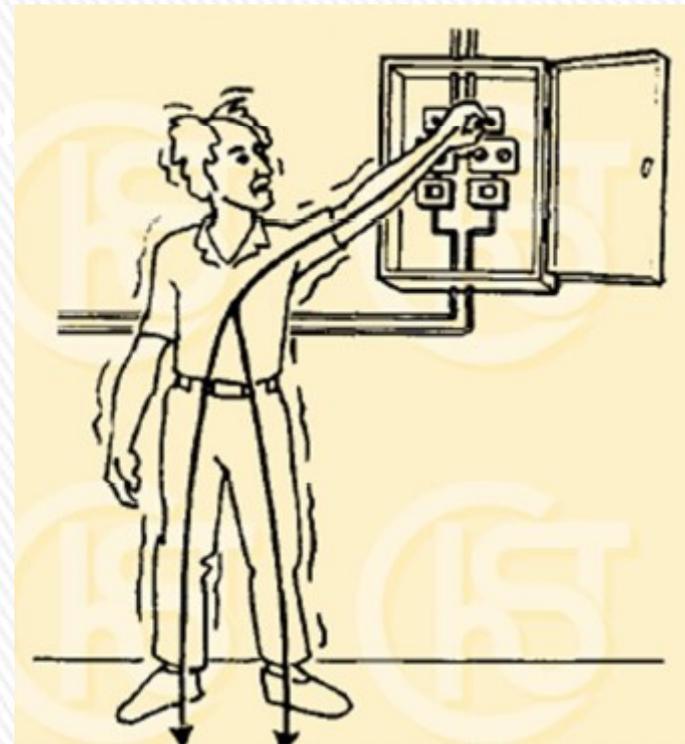
## Peligros de la Electricidad

**Sufrir un Shock Eléctrico (electrocución):** flujo de corriente que pasa a través del cuerpo de la persona.

**Ocurrir un Arco Eléctrico:** descarga de corriente entre dos elementos a través de un espacio compuesto por partículas ionizadas (plasma).

### Factores que determinan el riesgo en un shock eléctrico:

1. Intensidad de la corriente
2. Tiempo de contacto
3. Trayectoria de la corriente por el cuerpo
4. Impedancia (resistencia) del cuerpo
5. Tipo de corriente y frecuencia
6. Capacidad de reacción del organismo.



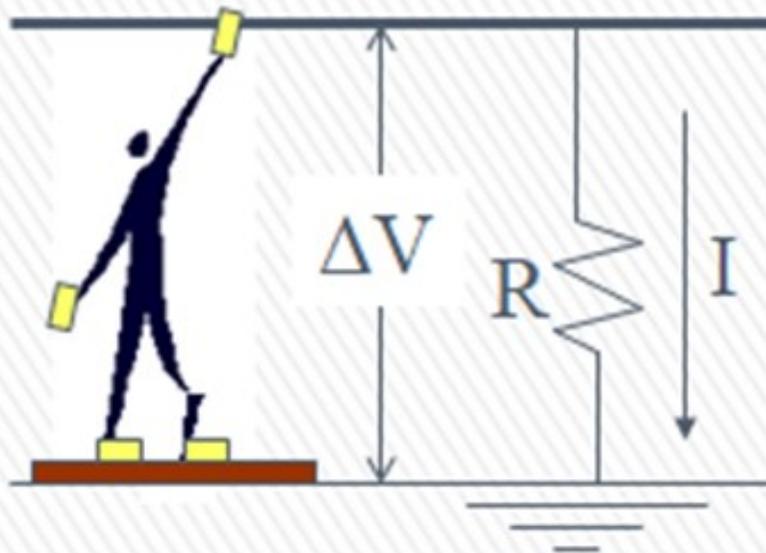
# Seguridad Eléctrica

## Aumento de la resistencia

- Tensión: 220 V
- Resistencia del cuerpo humano: 2.500  $\Omega$  (2,5 k $\Omega$ )
- Otras resistencias:
  - Alfombra: 6 k $\Omega$
  - Calzado: 5,5 k $\Omega$
  - Guantes: 6 k $\Omega$
- Resistencia total 20 k $\Omega$

Piel seca: 100 K $\Omega$ /cm<sup>2</sup>

Piel húmeda: 1000  $\Omega$ /cm<sup>2</sup>



$$I = \frac{\Delta V}{R} = \frac{220}{20.000} = 0,011 \text{ A} = 11 \text{ mA}$$

# Seguridad Eléctrica

## Efectos de una descarga eléctrica a través del cuerpo humano

Corriente	Efectos
1 – 5 mA (1 mA umbral-Kane)	Sensación de hormigueo
>3 mA	Descarga (dolor)
>10 mA (18 mA -Kane)	Contracciones musculares (no se despega)
>30 mA	Parálisis respiratoria (puede ser fatal)
>60 mA (100 mA umbral-Kane)	Fibrilación ventricular (por lo general fatal)
<b>&gt; 4 A</b>	<b>Parálisis cardiaca (fatal)</b>
<b>&gt;5 A</b>	<b>Quemadura del tejido (fatal, destruye órganos vitales)</b>

# Seguridad Eléctrica

## Umbral de no soltar:

Cuando una persona tiene sujetos unos electrodos, es el valor máximo de la corriente que permite a esa persona soltarlos. En corriente alterna se considera un valor máximo de 10 mA, cualquiera que sea el tiempo de exposición

## Umbral de percepción:

Es el valor mínimo de la corriente que provoca una sensación en una persona, a través de la que pasa esta corriente. Se considera un valor de 0,5 mA en corriente alterna cualquiera que sea el tiempo de exposición

## Umbral de fibrilación ventricular:

Es el valor mínimo de la corriente que puede provocar la fibrilación ventricular. La fibrilación ventricular está considerada como la causa principal de muerte por choque eléctrico.



# Seguridad Eléctrica –Cableado doméstico

En una instalación convencional, UTE distribuye energía eléctrica a los hogares por medio de **corriente alterna mediante dos o tres cables que conectan cada casa en paralelo.**

El sistema convencional consiste en dos **cables de corriente activa.**

Diferencia de potencial entre los alambres de corriente es aprox. de 220-230 V.

Este voltaje es de corriente alterna, es decir que varía sinusoidalmente con el tiempo. Gran parte de lo visto hasta ahora sobre el estado fem constante (corriente continua) puede aplicarse también a la corriente alterna que se suministra a industrias y hogares.

A fin de registrar el consumo de energía de la casa, un medidor (“contador”) se conecta en serie con los cables de corriente que entran en ella.

Después del contador, los cables se dividen para que existan varios circuitos separados en paralelo distribuidos por toda la casa.

Cada circuito debe contener **una llave térmica cortacircuitos** (o, en instalaciones más antiguas, un **fusible**). El cable y la llave cortacircuitos correspondiente a cada circuito deben ser cuidadosamente seleccionados para que cubran las necesidades de corriente de dicho circuito.

Si éste debe soportar una corriente tan grande como 30 A, deberán seleccionarse un alambre grueso y un cortacircuitos apropiado para manejar esta corriente.

Un circuito que se utiliza para alimentar sólo lámparas y pequeños artefactos domésticos a menudo sólo requiere 20 A.

Cada circuito tiene su propio cortacircuitos para proteger esta parte del sistema<sup>10</sup> eléctrico de la casa.



# Seguridad Eléctrica –Cableado doméstico

Baja tensión (< 1000V), UTE dos tipos de sistemas de distribución de **energía eléctrica de alterna 50Hz**: -

- Sistema trifásico de 220V con neutro aislado, 3 conductores (3 fases).
- Sistema trifásico de 400V con neutro aterrado, 4 conductores (3 fases y neutro).

UTE suministra energía eléctrica alterna 50Hz en tensiones:

- Monofásica 220V entre fases.
- Monofásica 230V entre fase y neutro.
- Trifásica 220V neutro aislado (3 conductores).
- Trifásica 400V con neutro aterrado (4 conductores).

**Suministro de UTE monofásico residencial: CA - 220 V 50 Hz**

**Rango de potencias de suministro residencial (KW): 3,7; 4,6; 7,4; 9,2.**

Potencia (KW)	Voltaje (V)	Corriente (A)
3,7	220	17
4,6	220	21
7,4	220	34
9,2	220	42



# Seguridad Eléctrica

## PELIGROS DE LA ELECTRICIDAD

Incendio: sobrecargas o cortocircuitos

Electrocución

### Consumos de artefactos

Artefacto	Potencia (W)	I (A)
Aire acondicionado (18000 BTU)	2200	10,0
Aire acondicionado (9000 BTU)	821	3,7
Calefón	1500	6,8
Heladera c/freezer	1020	4,6
Horno eléctrico	1200	5,5
Lavarropa	1020	4,6
Microondas	750	3,4
PC	70	0,3
Router	30	0,1
Secadora ropa	2000	9,1
TV LCD 34"	200	0,9



# Seguridad Eléctrica

## RIESGOS:

- 1) **Cortocircuito** - unión directa del polo positivo con el polo negativo de una fuente de alimentación. **Brusco aumento de la corriente** provocando un rápido calentamiento de los cables, pudiendo ocasionar un **incendio**.
- 2) **Sobrecarga** - cuando a una instalación **se le exige que entregue más corriente de la que puede dar**. Ocasiona **lento calentamiento de cables** y puede provocar un cortocircuito o un incendio.
- 3) **Descarga eléctrica** - Si bien todos los electrodomésticos deben estar aislados, de manera que la corriente no pueda “escaparse”, **no debemos descartar este riesgo, porque siempre existe**. Si una corriente se “fuga” del circuito, ésta queda “atrapada” en la carcasa metálica del electrodoméstico (heladera, lavarropas, gabinete de PC, etc.) La descarga eléctrica se conoce popularmente con el nombre de “patada”.



# Seguridad Eléctrica

## DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN:

Para evitar **cortocircuitos**, **sobrecargas** o posibles **descargas eléctricas**, se utilizan los **dispositivos de protección**.

Los **dispositivos de protección** pueden ser:

- 1- **Fusibles**
- 2- **Disyuntor diferencial**
- 3- **Puesta o descarga a tierra**
- 4- **Interruptor termomagnético (Térmica)**



# Seguridad Eléctrica

## FUSIBLES

Dispositivos de protección utilizados contra **cortocircuitos** y **sobrecargas** en todo tipo de electrodomésticos y en automóviles, por su bajo costo y fácil reemplazo.

Sin embargo, **en las instalaciones eléctricas domiciliarias casi han dejado de utilizarse.**

Compuesto por filamento de cobre muy fino y corto, colocado dentro de un tubo de vidrio, plástico o porcelana (aislante).

Se colocan al inicio del circuito, en serie con el mismo.

En caso de producirse un cortocircuito o una sobrecarga, **el filamento se calienta y se funde**, interrumpiendo el paso de corriente en todo el circuito.



# Seguridad Eléctrica

## DISYUNTOR DIFERENCIAL

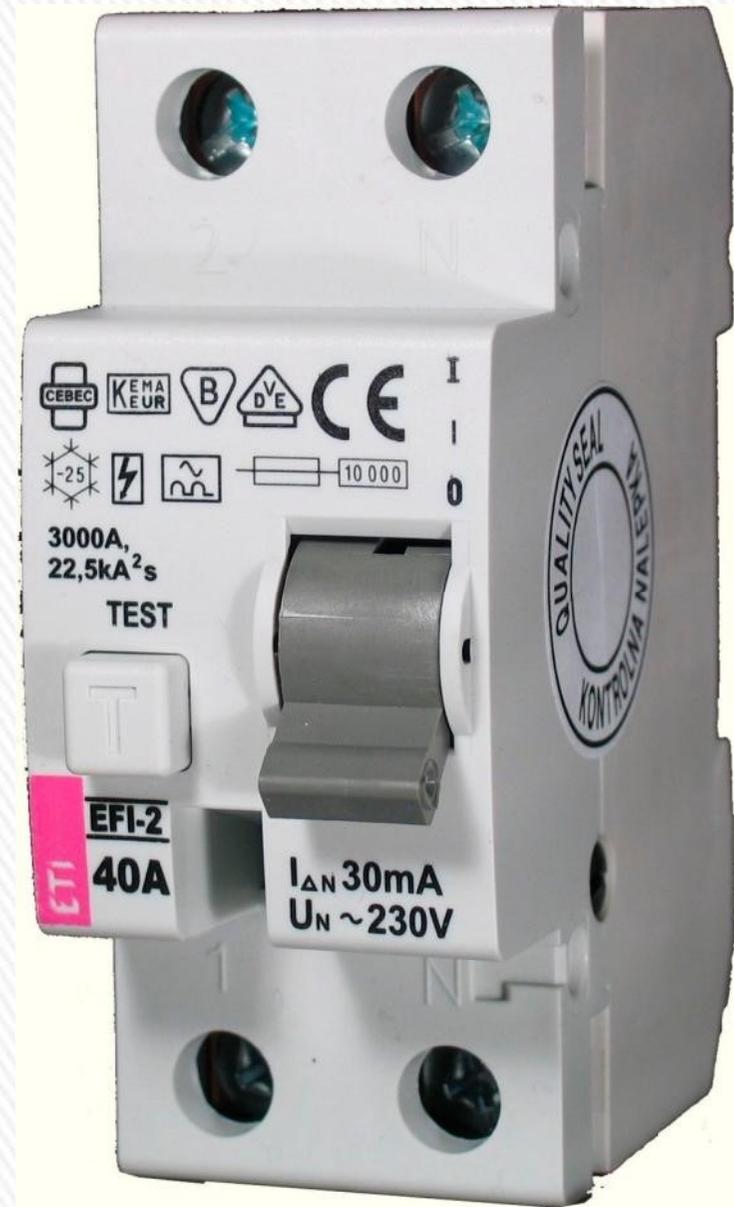
Normalmente la corriente de entrada y de salida de un circuito tienen que ser iguales.

Un **disyuntor diferencial** es un mecanismo que se coloca en una instalación eléctrica para **comparar la corriente que entra con la que sale**.

Si la corriente de salida es **menor**, significa que ha habido una “fuga”, entonces **el disyuntor interrumpe inmediatamente la electricidad** para evitar una descarga eléctrica peligrosa.

El **disyuntor diferencial** sirve para proteger a **las personas** de posibles electrocuciones.

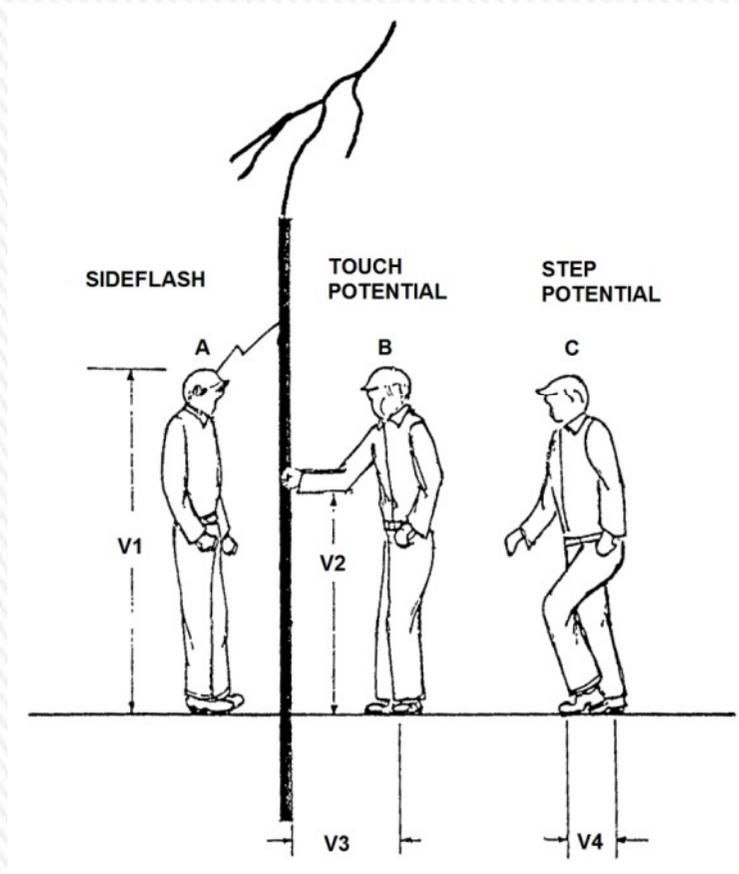
Pulsador (botón) de “reset”, que debe accionarse una vez al mes para asegurarse que el dispositivo funciona normalmente.



# Seguridad Eléctrica

## Sistema de puesta a tierra

- Limitar tensiones de toque y de paso durante fallas eléctricas (cortocircuitos) a niveles que no representen riesgo de choque eléctrico para las personas.
- Disminuir a valores mínimos las tensiones de objetos metálicos que se encuentran influenciados por inducciones de objetos energizados.
- Proporcionar un camino seguro para la corriente de las descargas atmosféricas (puestas a tierra de rayos).



© Christophe Suarez

# Física de las Descargas Atmosféricas



# Física de las Descargas Atmosféricas

Promedialmente en todo instante se están produciendo alrededor de 2.000 tormentas eléctricas en el mundo, ocupando las nubes de tormenta entre el 1 al 10% de la superficie terrestre.

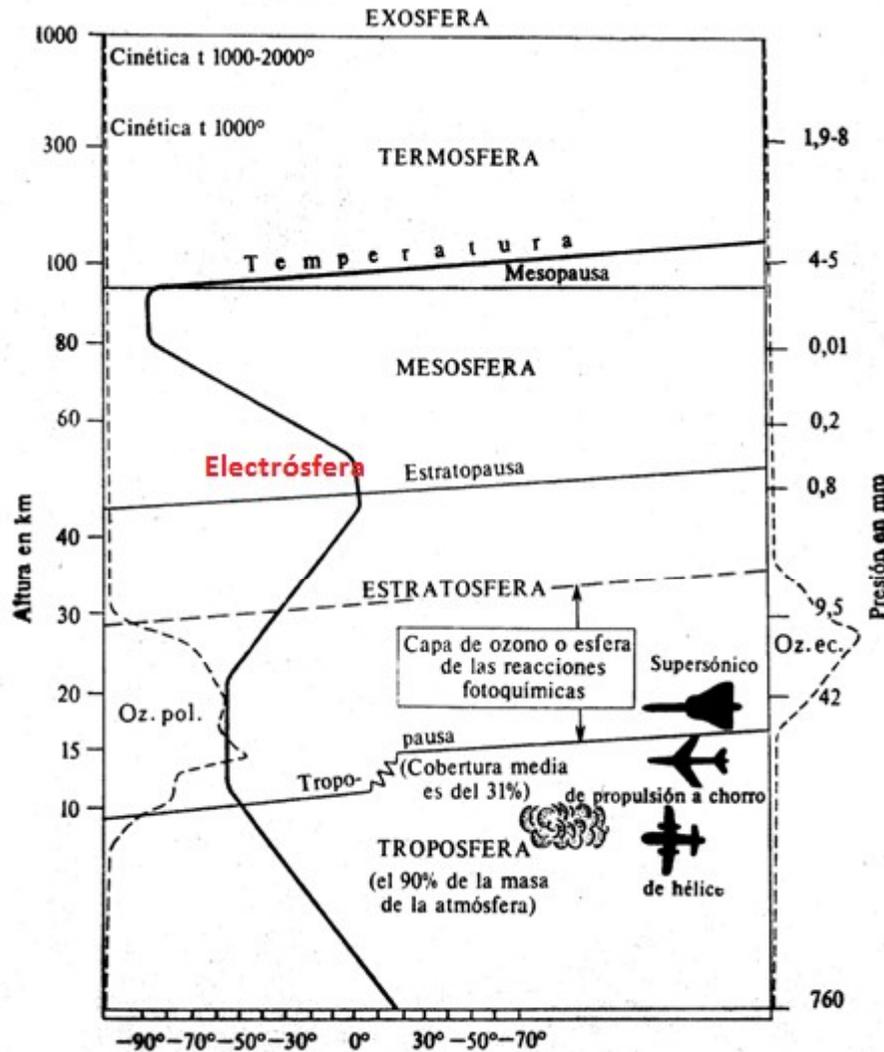
Cada segundo caen  $44 \pm 5$  rayos

Alrededor de 2.000 personas al año fallecen por una descarga directa

## Descargas atmosféricas



# ATMÓSFERA TERRESTRE



Capa de mezcla de gases que rodea a nuestro planeta con una composición casi constante hasta 25 km.

75 % de su masa se encuentra en los primeros 11 km de altura (tropósfera).

Componentes: oxígeno (20,95 % en volumen) y nitrógeno (78,09 %); 0,93% de argón, 0,03% de anhídrido carbónico y otros gases como el neón, xenón y helio en mucho menor proporción.

- Capas de la atmósfera terrestre: tropósfera,
- estratósfera,
- mesósfera y
- termósfera (ionósfera)
- exósfera.

**Electrosfera: es la región a partir de la cual se puede considerar equipotencial por su conductividad**

# Cumulonimbos

Gran tamaño y apariencia masiva con desarrollo vertical muy marcado.

Pueden tener en parte superior cristales de hielo de gran tamaño.

Nubes típicas de las tormentas intensas pudiendo llegar a producir granizo.

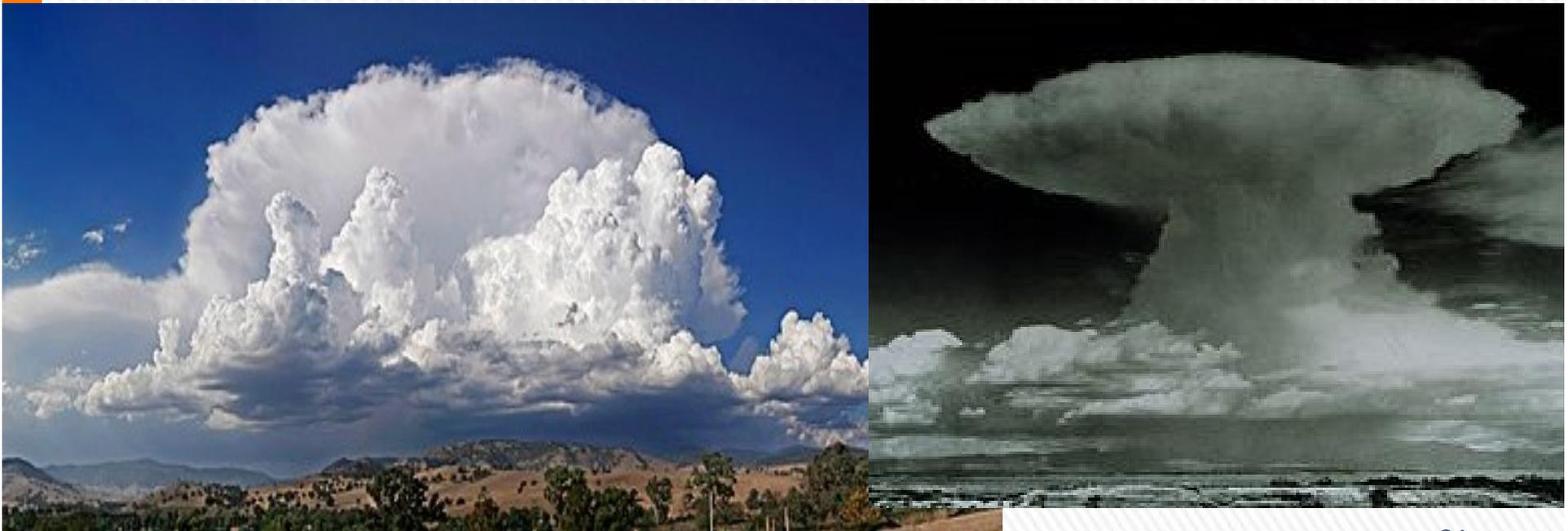
**Base a menos de 2 km de altura, cima puede alcanzar 5 a 23 km de alto.**

**Base puede tener más de 10 km horizontales.**

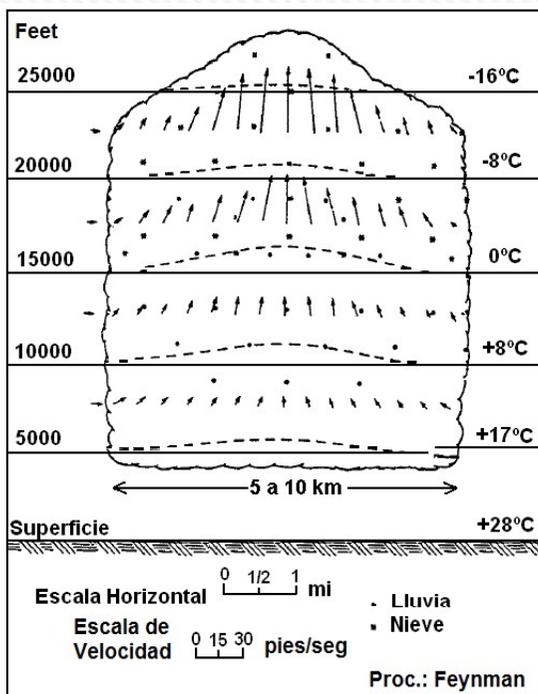
Cuando están plenamente desarrollados adoptan una forma de yunque.

Se producen ráfagas en ascenso (con humedad y nubes) y ráfagas en descenso (aire frío y seco) produce cargas de electricidad estática.

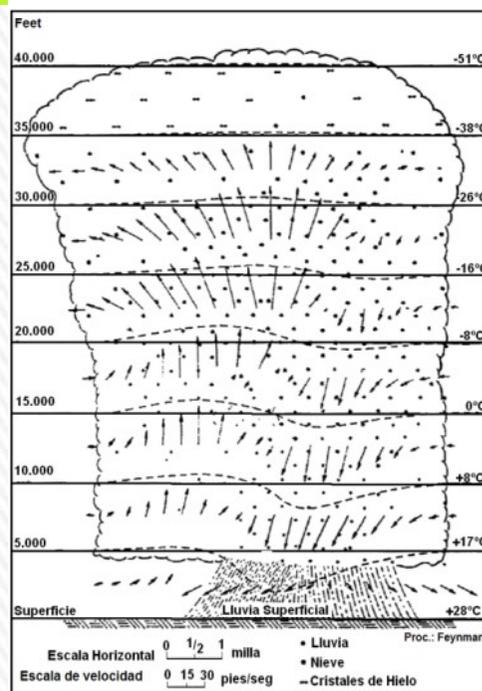
La descarga de esta electricidad causa el rayo y los relámpagos.



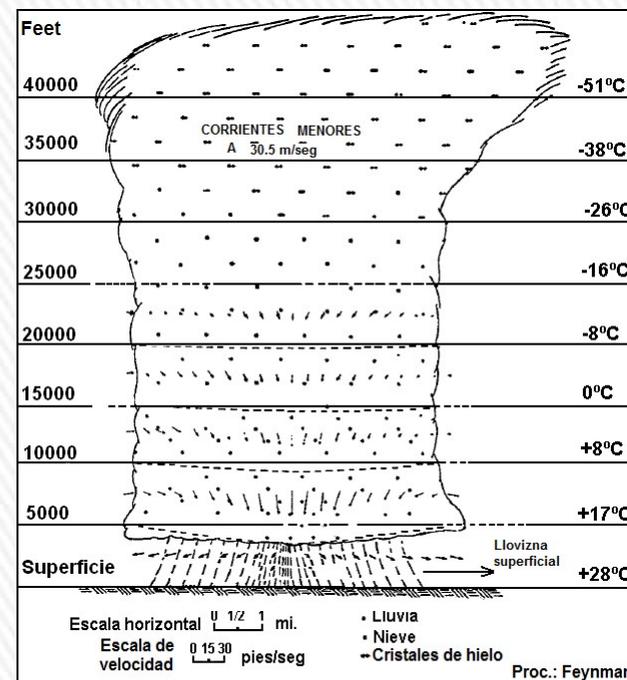
# CÉLULA DE TORMENTA



**Célula de tormenta eléctrica en las primeras etapas de su desarrollo**



**Célula madura de tormenta eléctrica**



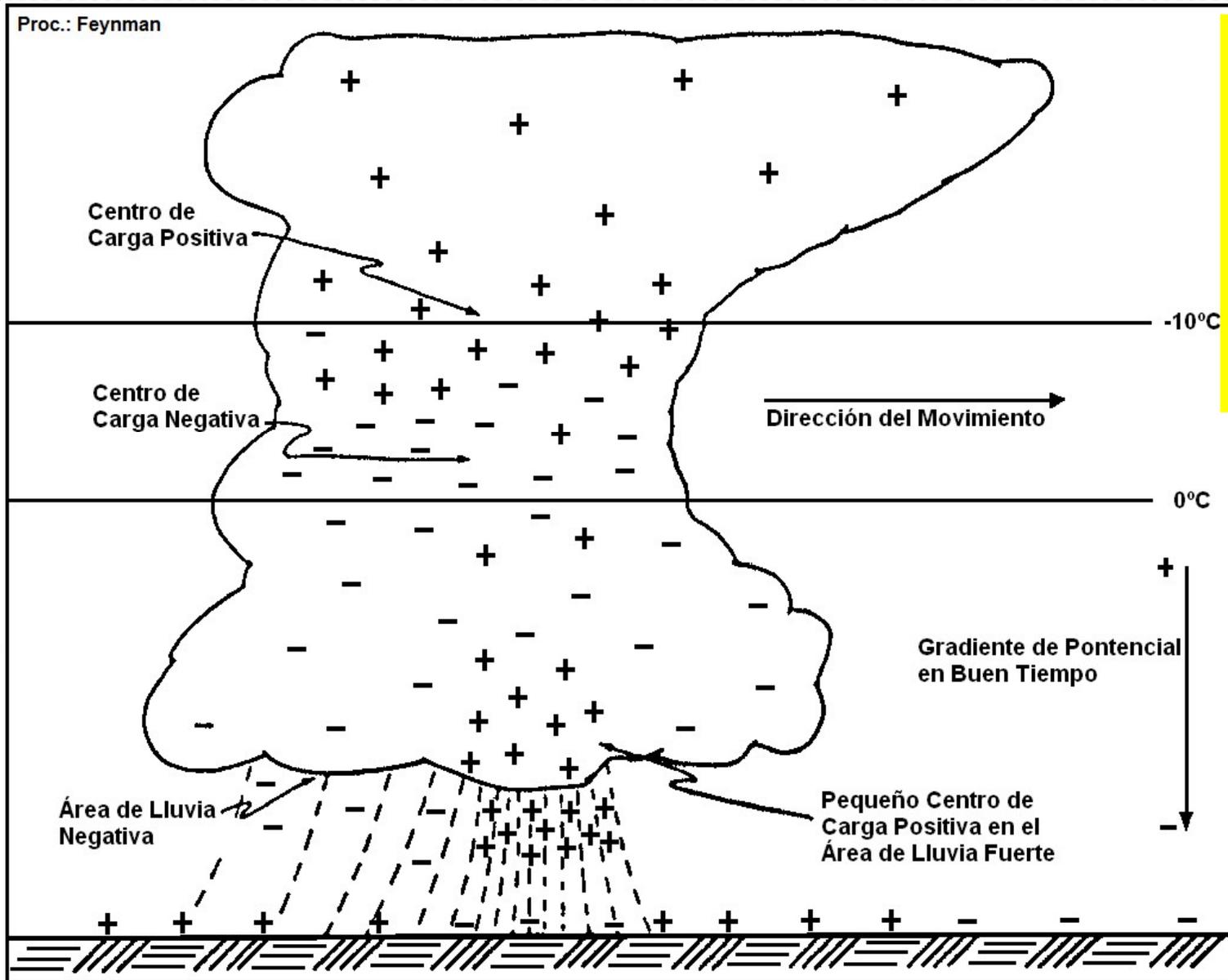
**Última fase de la célula de tormenta eléctrica**

**Célula de tormenta eléctrica en las primeras etapas de su desarrollo:** el aire húmedo sube: se genera una corriente del orden de 100 km/h que sube hasta 10.000 - 15.000 m. La humedad del aire se condensa y forma pequeñísimas gotas, que se enfrían rápidamente a temperaturas por debajo de 0 °C, pero no se congelan sino que se sobreenfrían a falta de partículas presente para iniciar la cristalización. Las gotas de agua sobre-enfriadas entran en contacto con alguna partícula (cristal de NaCl), se forma un cristal de hielo. También si entran en contacto con un cristal de hielo, se congelará instantáneamente. Hay una rápida acumulación de grandes partículas de hielo. Al principio, cuando los cristales de hielo y las gotas de agua sobre-enfriadas son pequeñas, no caen debido a la fuerza opuesta que ejerce la corriente ascendente, pero al ir creciendo en tamaño, ya la corriente no los puede detener y comienzan a caer arrastrando algo de aire con ellas y así se inicia una corriente descendente

**Célula madura de tormenta eléctrica** - Al cabo de 30 a 60 minutos, la corriente ascendente se detiene, porque ya no hay suficiente aire caliente para mantenerla. Caen las últimas precipitaciones por unos instantes, y luego toda nube se expande tomando la típica forma de yunque

# PROCESO DE CARGA DE LA NUBE

Distribución de cargas eléctricas en una célula madura de tormenta

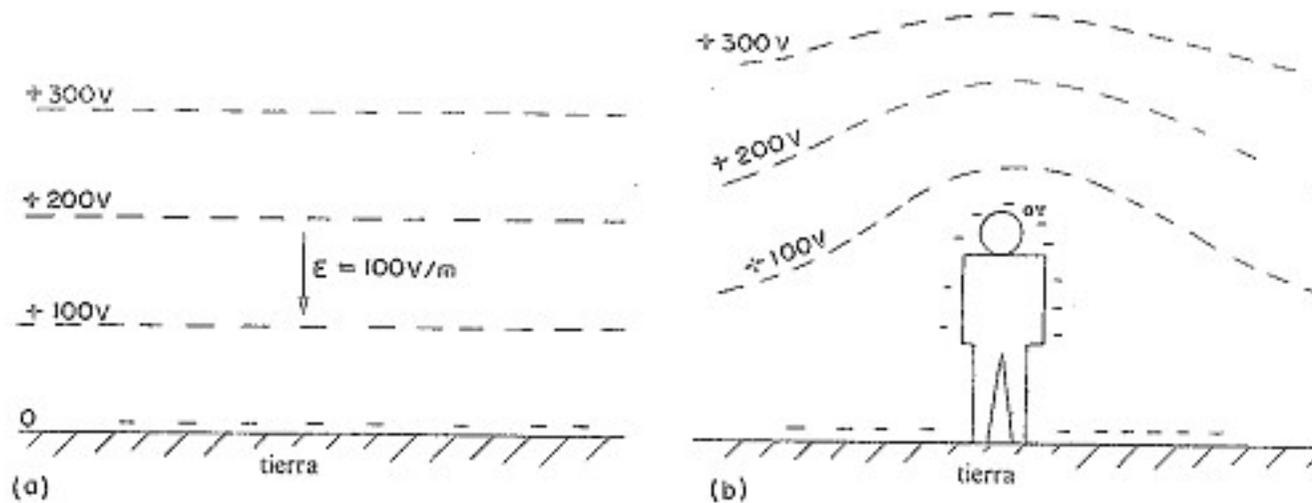


Modelo simplificado

Tripolar – aunque se comporta como un dipolo

# CAMPO ELÉCTRICO ATMOSFÉRICO

## Características del campo eléctrico atmosférico con buen tiempo



“Buen tiempo”: no existen precipitaciones, hay menos de 3/8 de cielo cubierto, y además no existen condiciones extremas de visibilidad o viento. El resto de las condiciones se suponen tiempo perturbado, aunque no necesariamente de condición de tormenta.

**Tormentas:** 1 al 10% del planeta

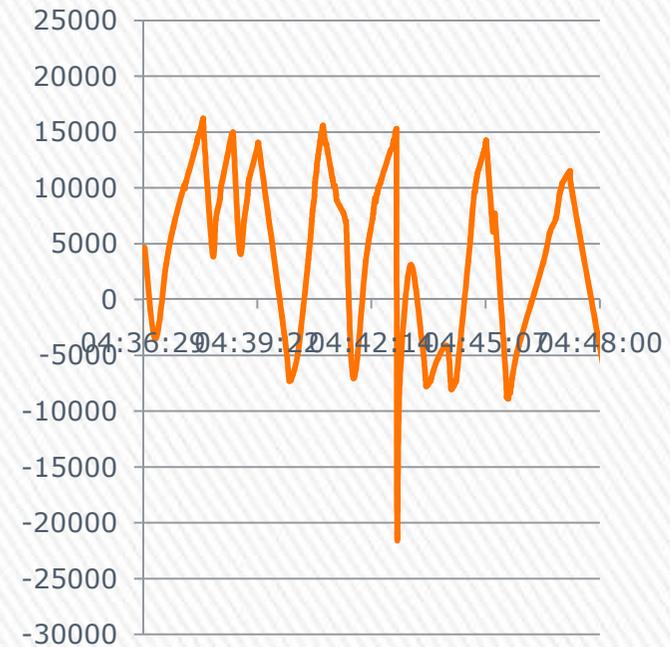
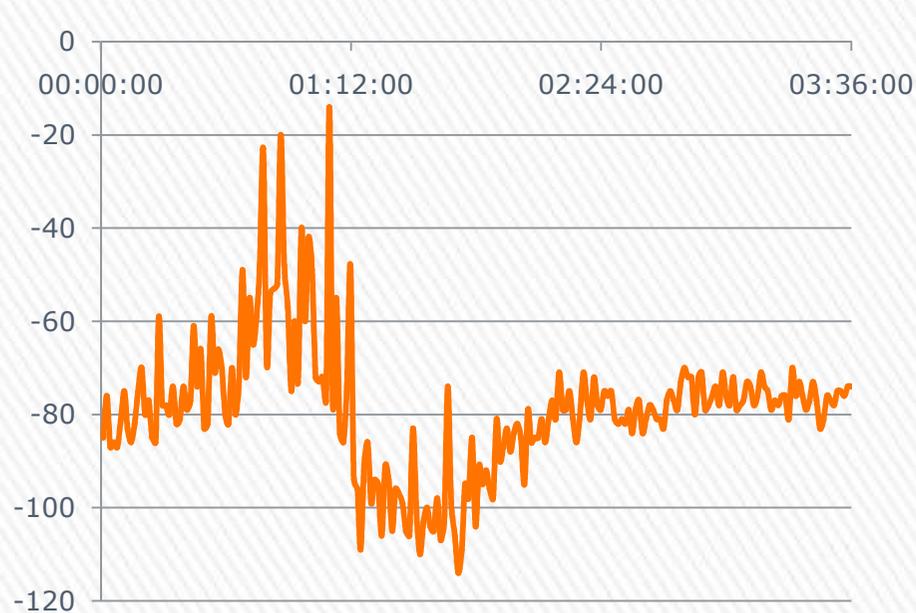
Feynman: “Lecturas de Física” Vol. 2, Cap. 9:

### 9-1 El gradiente de potencial eléctrico en la atmósfera

En un día ordinario sobre una llanura desierta, o sobre el mar, cuando uno se eleva a partir de la superficie terrestre el potencial eléctrico aumenta a razón de 100 volts por metro. Existe, entonces, un campo eléctrico vertical  $E$  de 100 volts/metro en el aire. El signo del campo corresponde a una carga negativa sobre la superficie de la tierra. ¡Esto significa que el potencial a la altura de sus narices es 200 volts más alto que el potencial a la altura de sus pies! Podrían preguntar: “¿por qué no se ubican dos electrodos en el aire a un metro de distancia uno de otro a fin de utilizar los 100 volts para alimentar nuestras luces eléctricas?” O bien podrían preguntar: “si realmente existe una diferencia de potencial de 200 volts entre mi nariz y mis pies, ¿por qué no recibo una descarga cuando salgo a la calle?”

# CAMPO ELÉCTRICO ATMOSFÉRICO

## Características del campo eléctrico atmosférico

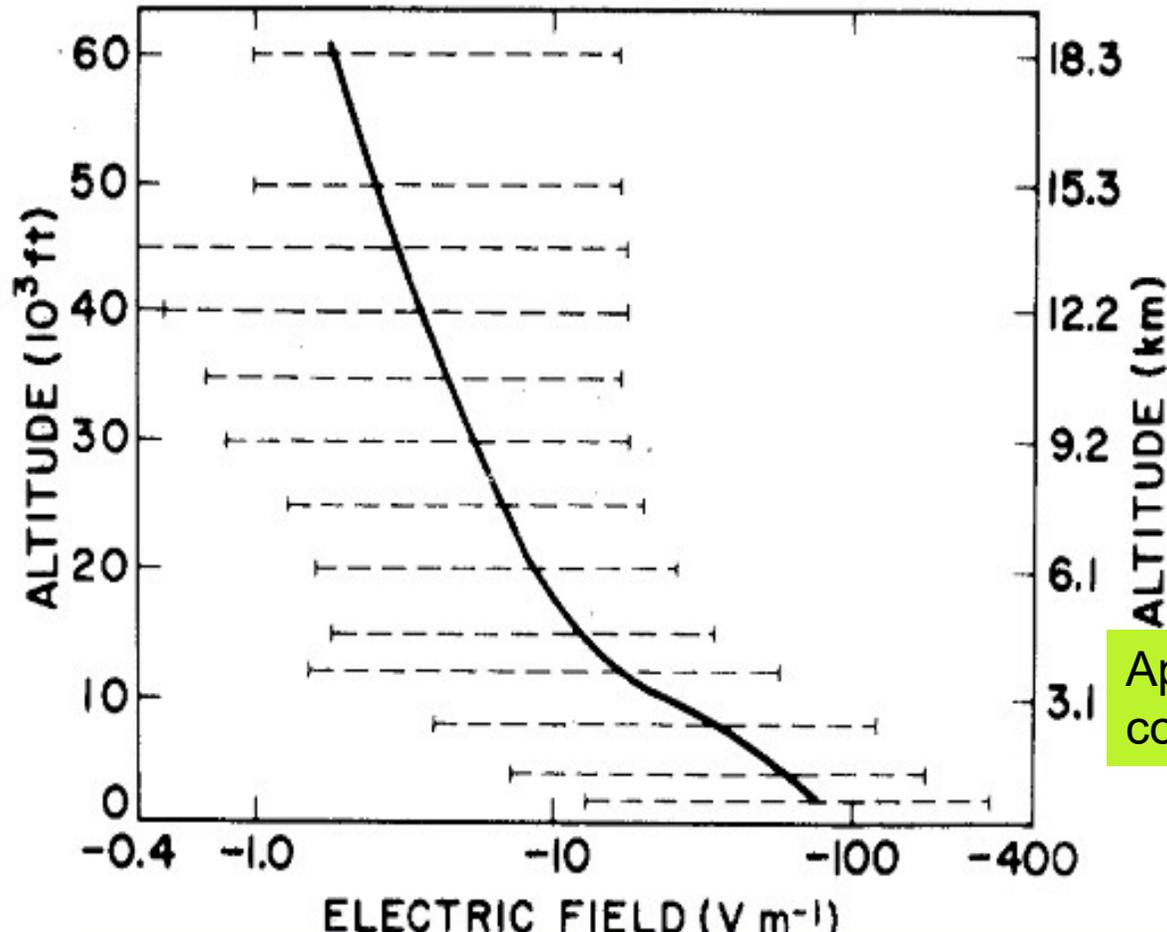


## Variación de E con la latitud:

Región:	Ecuador	60° latitud	Polo sur	Áreas industriales
Campo (V/m)	120	155	71	200-500

# CAMPO ELÉCTRICO ATMOSFÉRICO

## Variación del campo eléctrico atmosférico normal con la altura



A medida que se asciende en la atmósfera, y como la conductividad aumenta con la altura, el campo eléctrico disminuye.

Rakov y Uman:

a 10 km de altura aprox. 3% del valor sobre la superficie, 30Km: aprox. 300 mV/m, 85 km: del orden de  $1 \mu V/m$ .

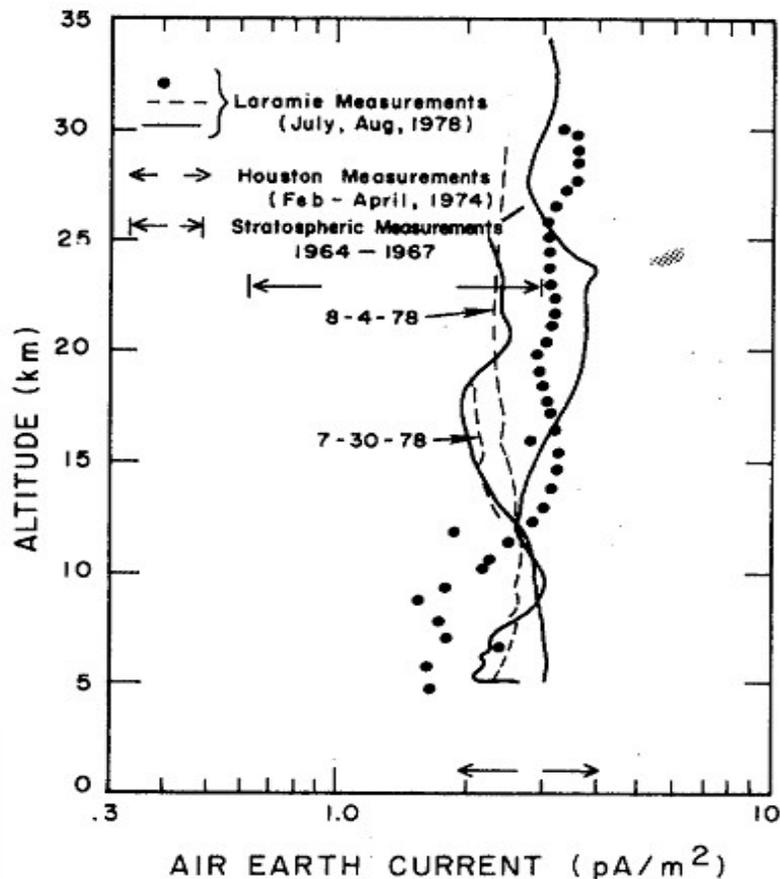
Aproximación a variación de  $E(z)$  con la altura  $z$ , hasta 85 km:

$$E(z) = E_0 e^{-kz}$$

$E_0$  es el valor del campo eléctrico atmosférico normal medido sobre el piso ( $z=0$ ),  $z$  es la altura y  $k$  es una constante que depende de la movilidad de los iones, cuyo valor aproximado es

$$k = 0,2 km^{-1}$$

# CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA ATMOSFÉRICA



Variación de la densidad de corriente  $J$  en  $\text{pA}/\text{m}^2$  con la altura

**Conductividad eléctrica ( $\sigma$ )** constante de proporcionalidad en la relación existente entre la densidad de corriente ( $J$ ) y el campo eléctrico ( $E$ ):  $J = \sigma E$  por lo que la conductividad viene expresada en  $\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$ .

A partir de esta conductividad atmosférica y de la existencia de un campo eléctrico, se puede hablar de una densidad corriente y por tanto de una corriente eléctrica.

Por tanto se puede decir que hay una corriente constante que fluye hacia la superficie de la tierra. Esta corriente se llama **corriente neta aire-tierra**.

Esta corriente varía a lo largo del día y del lugar geográfico.

## DENSIDAD DE CORRIENTE ATMOSFÉRICA

Se puede considerar que la misma varía entre 1 y 4  $\text{pA}/\text{m}^2$  (es decir de 1 a  $4 \times 10^{-12} \text{ Am}^2$ ).

Se puede asumir como valores medios: para los continentes 2,3  $\text{pA}/\text{m}^2$  para los mares 3,3  $\text{pA}/\text{m}^2$ .

# MODELOS ACTIVIDAD ELÉCTRICA ATMOSFÉRICA

## Modelo simple de la actividad eléctrica atmosférica

Zona entre la superficie terrestre y la electrósfera.

**Primero a partir del campo eléctrico atmosférico medio  $E_0$ , determinaremos la densidad de carga superficial  $\sigma$ .**

Consideramos una zona acotada de la superficie terrestre como un conductor, y aproximamos el aire al vacío.

Aplicando la ley de Gauss obtenemos la siguiente relación:  $E_0 = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$

$$\sigma = \epsilon_0 E_0$$

Considerando que la permitividad del aire es aproximadamente igual a la permitividad del vacío:

$$\epsilon_0 = 8,8542 \times 10^{-12} \text{ C}^2/(\text{N} \cdot \text{m}^2)$$

Tomando un valor de

$$E_0 = 110 \text{ V/m}$$

**Se obtiene un valor de  $\sigma = 9,74 \times 10^{-10} \text{ C/m}^2$**

Corresponde a una carga negativa ya que el campo es entrante a la superficie terrestre-

## MODELOS ACTIVIDAD ELÉCTRICA ATMOSFÉRICA

Considerando un radio medio de la Tierra igual a  $R= 6.371$  km y suponiendo a la misma como una esfera uniformemente cargada con la densidad de carga  $\sigma$  anteriormente calculada, se tiene que la carga neta de la Tierra vale:

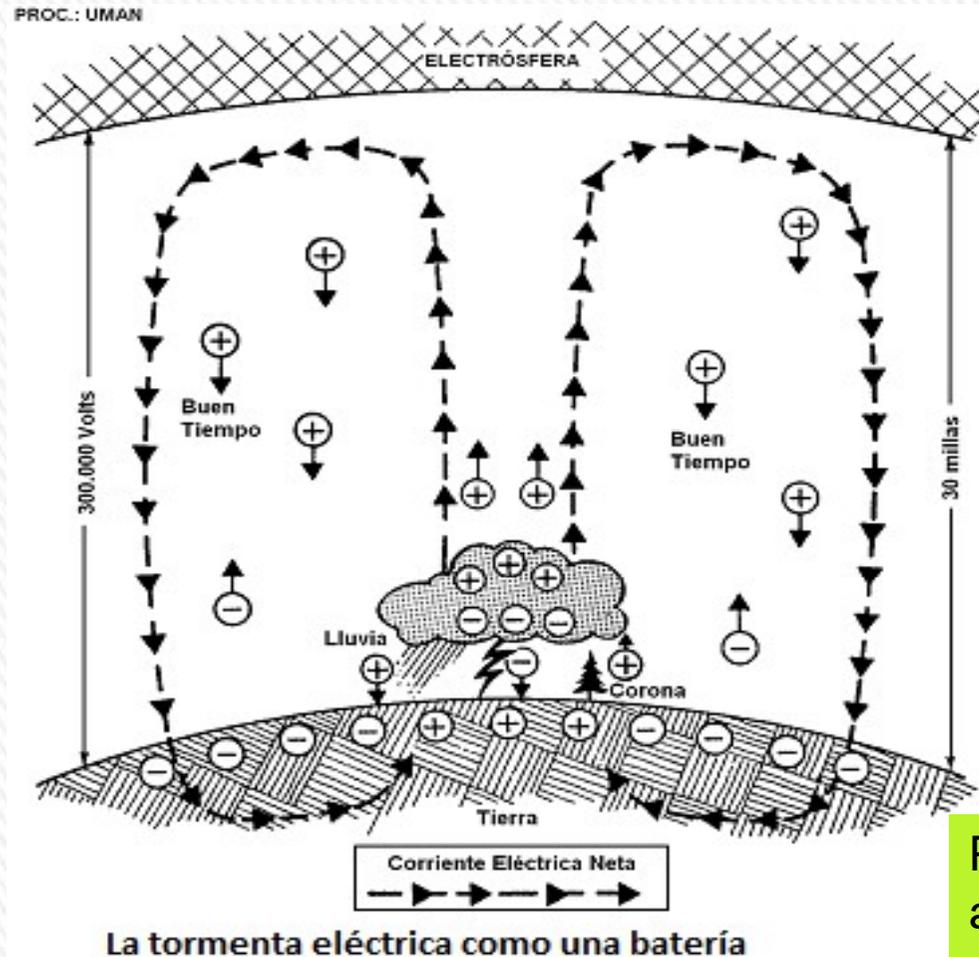
$$Q_T = (4\pi R^2)\sigma = 4,97 \times 10^5 \text{ C (carga negativa)}$$

$$Q_T = -5,0 \times 10^5 \text{ C}$$

**500.000 Coulombs (de carga negativa)**



# MODELOS ACTIVIDAD ELÉCTRICA ATMOSFÉRICA



**Corriente que se descarga a través de la atmósfera.**

**Densidad de corriente (J)** uniforme neta en toda la superficie terrestre e igual a  $3,00 \times 10^{-12} \text{ A/m}^2$ , entrante hacia la tierra.

Corriente total ( $I_T$ ):

$$I_T = (4\pi R^2)J = 1,53 \times 10^3 \text{ A}$$

**Corriente total es del orden de 1500 Amperes.**

Por tanto la carga total de la Tierra de aproximadamente  $-500.000\text{C}$  recibiendo una corriente aproximada de  $1000 \text{ A}$  se terminaría descargado en aproximadamente 325 segundos (menos de 6 minutos para los valores tomados).

# MODELOS ACTIVIDAD ELÉCTRICA ATMOSFÉRICA

Pero sabemos que esto no sucede, entonces ¿qué es lo que hace que la tierra se mantenga cargada?

Como veremos, esta tarea la realizan los *rayos*.

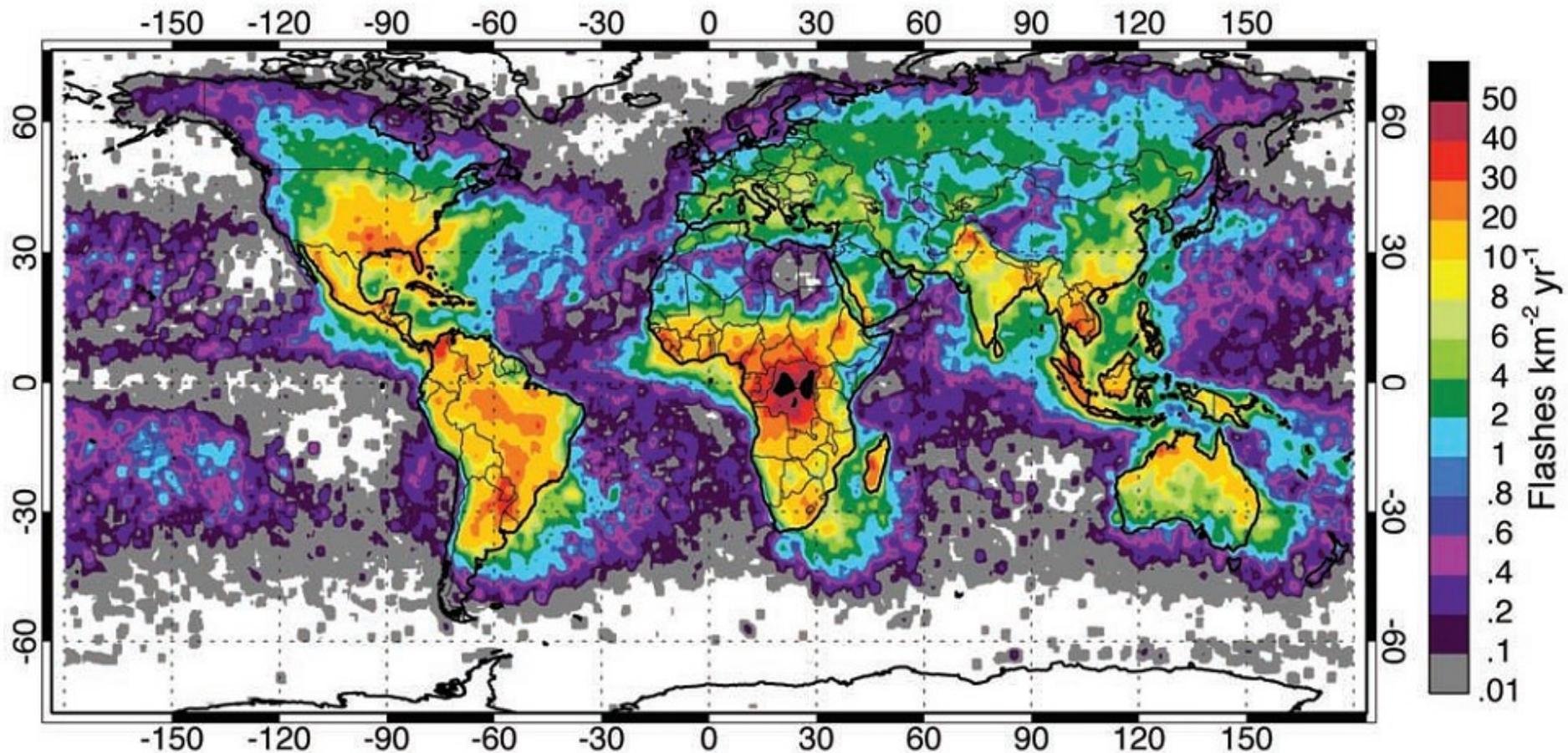
Promedialmente cada segundo están cayendo entre 40 y 100 rayos a la tierra y cada uno de ellos transfiere una carga negativa promedio de 20 Coulombs, por tanto esto equivale a una corriente negativa que ingresa a la superficie entre 800 y 2000 Amperes.

## Otras fuentes de compensación:

1. Descargas positivas de efecto corona desde cualquier elemento puntiagudo.
2. Bajo la nube, la dirección del campo eléctrico  $E$  es opuesta al de las regiones con buen tiempo, está orientado de tierra a nube y mucho más intenso, alcanzando valores del orden de  $10.000 \text{ V/m}$ .
3. En los objetos puntiagudos las líneas de campo se aprietan (aumento de campo eléctrico por la curvatura de las superficies equipotenciales) y el aire circundante se ioniza, generándose carga positiva que sube muy lentamente
4. Otra: la lluvia baja algo de carga positiva contribuyendo inversamente, por lo tanto no es una fuente de compensación.

# FRECUENCIA Y DISTRIBUCIÓN DE TORMENTAS

Cantidad de rayos caídos por año y por kilómetro cuadrado



The annualized distribution of total lightning activity (in units of  $\text{fl km}^{-2} \text{yr}^{-1}$ ).

The Optical Transient Detector (OTD) is a space-based instrument specifically designed to detect and locate lightning discharges as it orbits the Earth.

# FRECUENCIA Y DISTRIBUCIÓN DE TORMENTAS

## Ranking de las 10 regiones con registros con más rayos

Pos.	Lugar	Nº flashes /(km <sup>2</sup> .año)	Días de tormenta
1	Kamembe, Ruanda	82,7	221
2	Boende, República Democrática del Congo	66,3	118
3	Lusambo, República Democrática del Congo	52,1	119
4	Kananga, República Democrática del Congo	50,3	139
5	Kuala Lumpur, Malasia	48,3	180
6	Calabar, Nigeria	47,4	216
7	Franceville, Gabón	47,1	?
8	Fortaleza, Argentina	42,7	57
9	Ocana, Colombia	39,9	?
10	Concepción, Paraguay	37	?

**Sin embargo hay otras regiones donde la actividad eléctrica incluso llega a triplicar a las registradas en esta tabla, como el denominado " Relámpago del Catatumbo" con un valor de 250.**

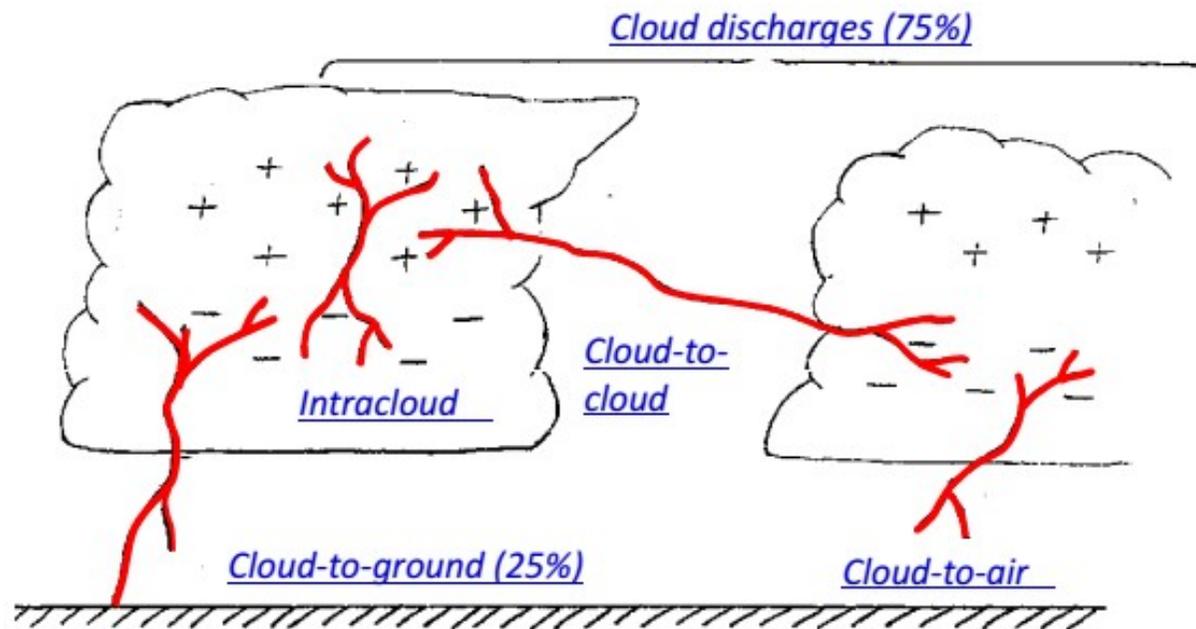
**En Uruguay se estimaba 5 rayos/(año.km<sup>2</sup>)**

# TIPOS DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Hay cuatro tipos de descargas atmosféricas básicas:

- 1) Intranube (relámpago) (la más frecuente) –Intracloud lightning (IC)
- 2) Entre nube y tierra o tierra-nube (rayo) (cloud to ground CG)
- 3) Entre dos nubes (menos frecuente) (cloud to cloud: CC)
- 4) Entre la nube y al aire circundante

## 2. Types of Lightning Discharges



Types of lightning discharges from cumulonimbus

# TIPOS DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

## INTRA-NUBE



Héctor Korenko -2016 -Física de las Descargas atmosféricas

# TIPOS DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

## NUBE-TIERRA (C-G)



Héctor Korenko -2016 -Física de las Descargas atmosféricas



# TIPOS DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

## NUBE-NUBE (C-C)



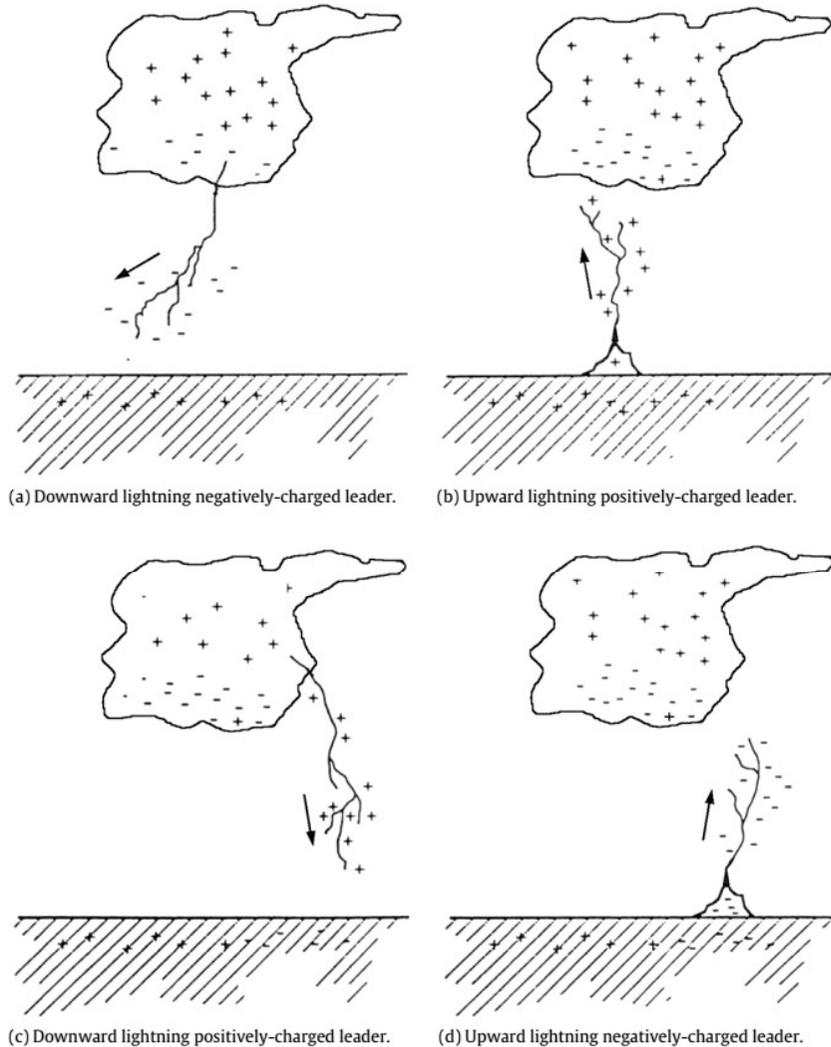
# TIPOS DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

## NUBE-AIRE (C-A)



# TIPOS DE RAYOS

J.R. Dwyer, M.A. Uman / Physics Reports 534 (2014) 147–241



<sup>1</sup>  
Dentro de las descargas entre nube y tierra existen cuatro tipos de rayos dependiendo de la dirección de propagación y de la polaridad de la carga efectivamente transferida de la nube a tierra.

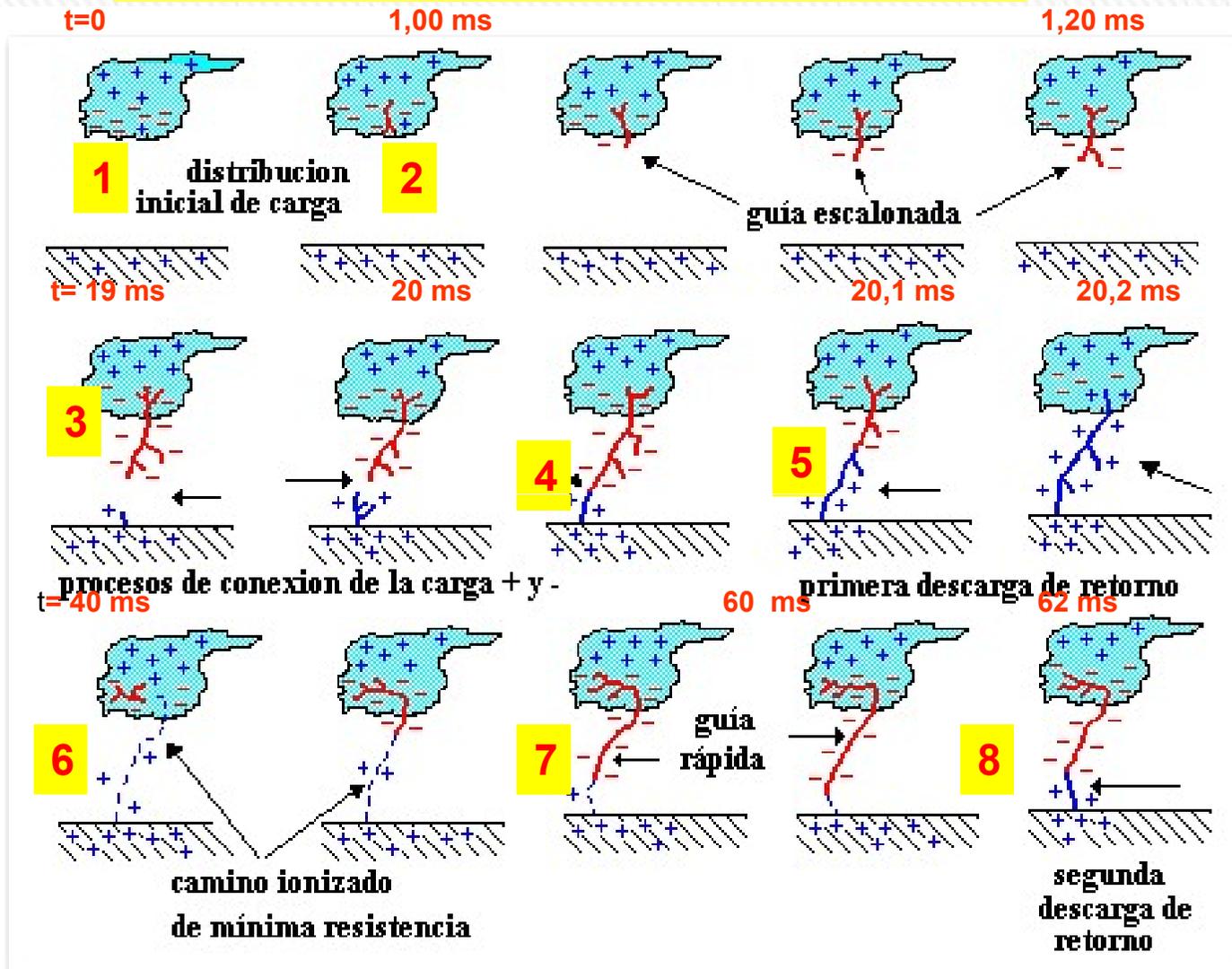
- 1 Descendente negativo (-CG)
- 2 Ascendente positivo (+GC)
- 3 Descendente positivo (+CG)
- 4 Ascendente negativo (- GC)

**Fig. 1.2.** The four types of cloud-to-ground lightning flashes as defined from the direction of leader propagation and the charge on the initiating leader. Source: Adapted from Berger [490].



# FORMACIÓN DE LA DESCARGA ENTRE NUBE Y TIERRA

## Rayo nube-tierra negativo (-CG)



# FORMACIÓN DE LA DESCARGA ENTRE NUBE Y TIERRA

## Rayo nube-tierra negativo (-CG)

**1) Ruptura preliminar-** 90 % de las descargas nube-tierra se inician en el interior de la nube y llevan carga negativa a tierra. Se inicia en un fenómeno llamado “Ruptura Preliminar”, descarga electrostática en el interior de la nube, en zona de carga negativa (altura de unos 5 a 8 km). Es seguida por un proceso de descarga dentro de la nube que dura algunos milisegundos a partir del cual se comienza a formar la llamada “Guía Escalonada” de la nube a tierra.

**2) Guía escalonada descendente-** Si  $E$  asociado a la ruptura preliminar es suficientemente grande se produce un fenómeno de propagación de un canal de aire ionizado cargado negativamente llamado **guía escalonada o trazador descendente**. Es un “tubo” de plasma altamente ionizado de algunos centímetros de diámetro, rodeado de una envoltura tipo “descarga en corona” con un diámetro del orden de un metro, de cierta luminosidad y que avanza de a saltos. Saltos o escalones desde un punto se produce una descarga duración:  $1 \mu\text{s}$ ;  $I = 100$  a  $1000 \text{ A}$ ,  $V = 10^6$  a  $10^7 \text{ m/s}$ , propagación: 50 a 100 m; tiempo de espera:  $50 \mu\text{s}$ . Luego otro salto cuya dirección no está relacionada con el salto anterior, pudiendo incluso ramificarse y cada rama desarrollarse independientemente de las otras, también a saltos.

**3) Trazador ascendente-** Al acercarse la guía escalonada a tierra, cuando el campo promedio entre la punta de la guía y los puntos salientes de tierra (que son múltiples en cualquier entorno normal) llega a unos **500 kV/m** las corrientes corona de dichos puntos aumentan y se transforman en canales ionizados que se propagan hacia arriba de manera análoga a la propagación de la guía escalonada, impulsados por el propio campo eléctrico. La velocidad de trazadores:  $10^4$  a  $3 \times 10^5 \text{ m/s}$ . Generalmente se forman varios de ellos en diferentes puntos donde se alcanza el campo eléctrico crítico ( $E$  crítico). Alcanzan alturas de 10 a 50 m.

**4) Proceso de enlace-** Las puntas de la guía escalonada descendente y los trazadores ascendentes se acercan. Cuando el campo entre la punta de uno de esos trazadores ascendentes y la punta de la guía descendente llega a un valor suficientemente alto (aprox.  $3 \times 10^6$  ruptura dieléctrica del aire), se completa el canal conductor entre tierra y nube y se produce la primera descarga de retorno entre la nube y el objeto que emitió el trazador ascendente. El objeto se convierte entonces en el punto de impacto. El trazador ascendente exitoso, que es de los múltiples trazadores generados por una guía el que logra establecer la conexión, proviene generalmente de uno de los primeros objetos cuya distancia a la punta de la guía descendente llega a un valor tal que el campo medio a través de esa distancia adquiere el valor crítico.

# FORMACIÓN DE LA DESCARGA ENTRE NUBE Y TIERRA

## Rayo nube-tierra negativo (-CG)

**5) Primera descarga de retorno-** Su sentido de propagación es ascendente, vale decir contrario al sentido del trazador escalonado que, es descendente. Muy luminosa, de aspecto ramificado y muy intensa, con corrientes del orden de decenas de miles de amperios. El frente de onda se propaga a una velocidad del orden de 1/10 de la velocidad de la luz. La longitud típica del canal es de 5 km (2 a 14 km). La duración del recorrido desde tierra hasta la nube es del orden de 70 microsegundos. Es acompañada eventualmente de intensas ondas sonoras denominadas trueno, provocadas por la expansión supersónica del aire que rodea al canal de la descarga eléctrica. Presión en el canal: 10 atm, temperatura: 30.000 K.

**6) Proceso de reconstitución de la carga de la nube-** Después de la primera descarga se tiene dentro de la nube una zona sin carga pero con una conductividad mayor que el aire circundante (aprox.  $\sigma = 0,01 \text{ S/m}$ ) y se produce la sexta etapa de la descarga que consiste en **procesos de reconstitución de la carga**. Tiene una duración media aproximada de 50 ms. Surgen diferentes procesos que reconstituyen el campo eléctrico en la nube.

**7) Guía dardo (dart leader)-** Cuando la carga se reconstituido a un nivel suficientemente alto, se produce otra transferencia de carga en forma continua por el canal original, que queda ligeramente ionizado y ya formado. Tiene características diferentes a la de la guía escalonada. Se observa una zona del canal, débilmente luminosa, de algunos metros de largo. Velocidad:  $10^7 \text{ m/s}$ . Desplazándose por el camino establecido por la primera descarga. Recorre solamente el canal principal, ignorando las ramificaciones. Cuando esta guía llega a tierra queda establecido un canal conductor ionizado entre nube y tierra y su carga se transfiere a tierra formando una segunda descarga de retorno.

**8) Segunda descarga de retorno y descargas subsiguientes-** La transferencia de carga de la 2da. descarga de retorno se produce sobre el mismo punto del impacto principal. El 2do. retorno, tiene una corriente de menor valor de pico, pero  $dl/dt$  es mayor. En la mayor parte de los rayos ocurren más de dos descargas de retorno. La 2da. y las subsiguientes tienen características similares. Se han registrado rayos con decenas de descargas que siguen al primer retorno, todas recorriendo solamente el canal principal. Si uno observa un rayo a simple vista constata frecuentemente que el rayo principal es de gran luminosidad y pulsante mientras que las ramificaciones son fijas y más débiles. Tanto la descarga principal como las subsiguientes tienen una duración del orden de decenas de micro segundos a algunos mili segundos.

# FORMACIÓN DE LA DESCARGA ENTRE NUBE Y TIERRA

## Rayo nube-tierra negativo (-CG)

<https://www.youtube.com/watch?v=BxQt8ivUGWQ>



Guía escalonada descendente - primeros pasos



Guía escalonada descendente ramificaciones próximas a tierra



# FORMACIÓN DE LA DESCARGA ENTRE NUBE Y TIERRA

## Rayo nube-tierra negativo (-CG)



Guía ascendente desde tierra que conecta con algún ramal descendente. Llama la atención la luminosidad inicial del sistema cuando el circuito tierra-nube se cierra.



La primera descarga de retorno supone el inicio desencadenante de la liberación de energía que se pone de manifiesto de muchas formas, como por ejemplo, el aumento de la luminosidad del canal ionizado principal y de otras ramificaciones. >

# FORMACIÓN DE LA DESCARGA ENTRE NUBE Y TIERRA

## Rayo nube-tierra negativo (-CG)



**Descargas de retorno siguientes.**  
El proceso de anulación y redistribución de cargas puede continuar mediante sucesivas subdescargas de retorno, menos luminosas que la primera: fase luminosa de una subdescarga de retorno

**Canal ionizado resultante de las sucesivas subdescargas de retorno**



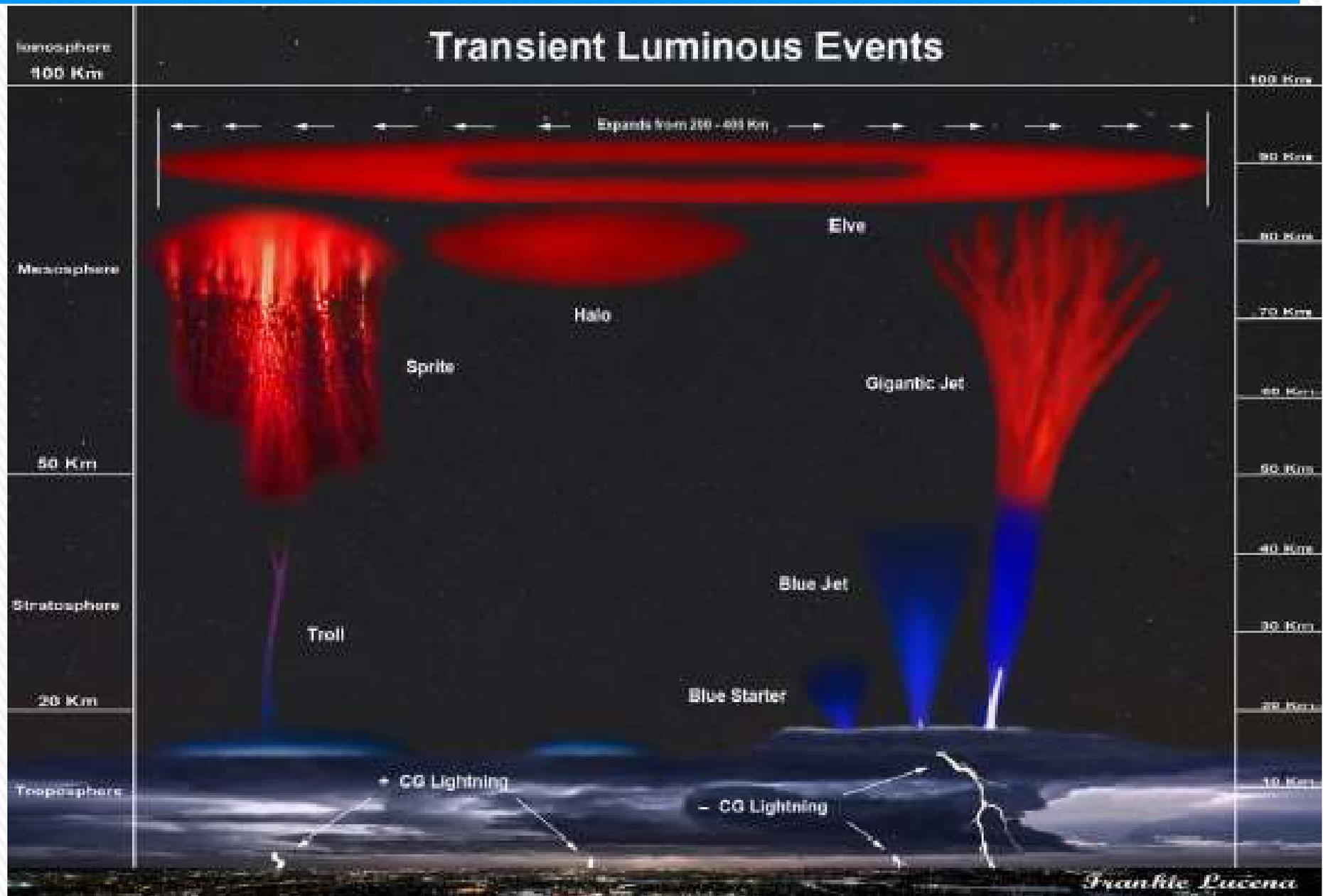
# VALORES REPRESENTATIVOS DE LAS MAGNITUDES FÍSICAS DE LAS DESCARGAS

## DESCARGA COMPLETA

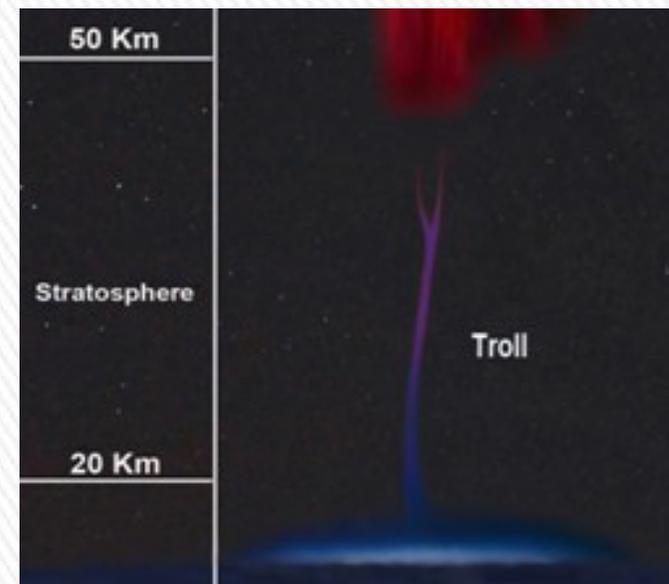
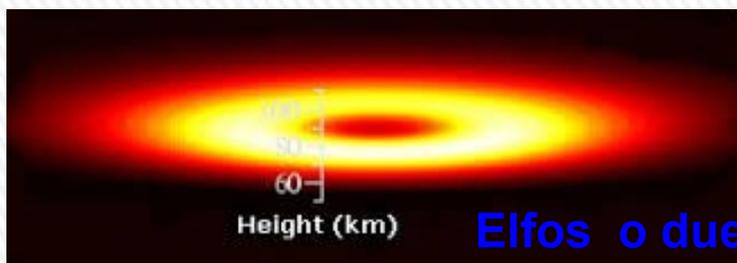
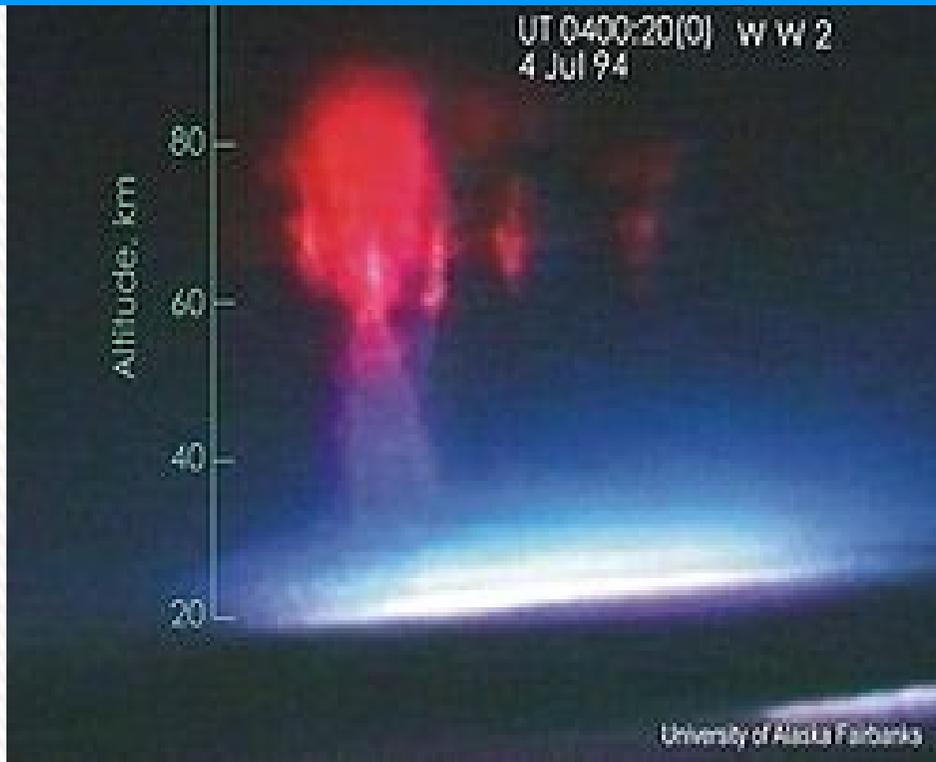
Magnitud	Mínimo	Representativo	Máximo
Velocidad de propagación ( $m/s$ )	$2,0 \times 10^7$	$8,0 \times 10^7$	$1,6 \times 10^8$
Velocidad de subida ( $kA/\mu s$ )	—	40	>100
Tiempo de subida ( $\mu s$ )	>0,2	1	>4,5

Magnitud	Mínimo	Representativo	Máximo
Número de descargas	1	3-4	26
Intervalo de tiempo entre descargas individuales en ausencia de corriente continua ( $ms$ )	3	40	100
Duración de una descarga completa ( $s$ )	$10^{-2}$	0,2	2
Carga transferida incluyendo la corriente continua (Coul)	3	25	90

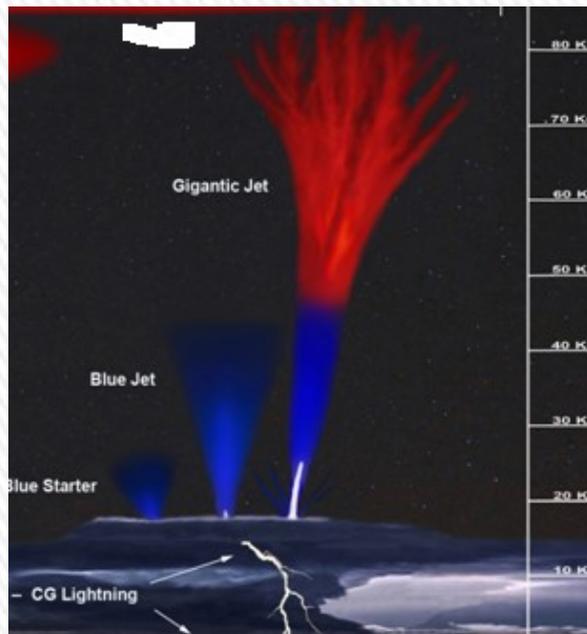
# Eventos luminosos transitorios (ELT) o descargas súper atmosféricas



# Eventos luminosos transitorios (ELT) o descargas súper atmosféricas



# Eventos luminosos transitorios (ELT) o descargas súper atmosféricas



<https://www.youtube.com/watch?v=WuTajlXMldU>

Fenómenos atmosféricos: Duendes, Jets, Elfos y más. (2:01)

<https://www.youtube.com/watch?v=pnAAB0z2o-k>

Blue jets and Red sprites (1:28)

<https://www.youtube.com/watch?v=1xVThAFfP0E>

"Red Sprites & Blue Jets" - the video (5:47)

**2.1.15- Electricidad atmosférica-** Se puede realizar un modelo simple de la actividad eléctrica terrestre de la siguiente forma. La superficie terrestre se puede considerar como un conductor, y se constata que con buen tiempo, es decir sin nubes de tormenta, existe un campo eléctrico con un valor promedio de 120 V/m, dirigido hacia el centro de la Tierra. Este campo eléctrico no es uniforme y disminuye con la altura. Cuando se dan las condiciones de tormenta eléctrica, este campo en la atmósfera, cercano al suelo invierte su sentido y aumenta en varios órdenes de magnitud (de 10,0 a 500 kV/m)

En la atmósfera existen portadores de carga libres (iones), con una densidad no uniforme, aumentando con la altura. A partir de los 40-60 km de altura, la atmósfera tiene una conductividad suficiente como para considerarla conductora y por lo tanto equipotencial. A esta zona que comienza a esa altura y se extiende indefinidamente se le da el nombre de electrósfera. La diferencia de potencial entre la superficie terrestre y la electrósfera es de 200 a 500 KV, con un valor medio de 300 KV).

Como hay partículas cargadas en presencia de un campo eléctrico, las mismas se desplazan, produciendo una densidad de corriente  $J$  (corriente por unidad de área) con buen tiempo, como se muestra en la figura. Esta densidad de corriente en buen tiempo se ha medido experimentalmente, y se obtiene un valor de  $J = 2,00$  a  $4,00$  pA/m<sup>2</sup>.

También se sabe que cada segundo están "cayendo" entre 40 y 100 rayos a la tierra y cada uno de ellos transfiere una carga negativa promedio de 20 coulombs.

- a) A partir del campo eléctrico sobre la superficie terrestre con buen tiempo, determina la densidad superficial de carga  $\sigma$ , y suponiendo que la misma es uniforme en todo el planeta, estima el valor de la carga sobre la superficie terrestre. ¿Corresponde a un exceso de cargas positivas o negativas?
- b) Determina a partir de la densidad media de corriente, la intensidad total que entra sobre la superficie del planeta. A partir del valor hallado estima el tiempo que tardaría la Tierra en descargarse, suponiendo que en todo el planeta hay buen tiempo.
- c) Explica por qué efectivamente no se produce dicha descarga, y se sigue manteniendo cargada.
- d) Realiza un modelo de capacitor para las condiciones de buen tiempo y determina el valor de su capacitancia. ¿Podrías realizar otro modelo de capacitor para la situación de una nube de tormenta y el suelo?

a) Modelo la superficie de la Tierra como un conductor plano. Usando este modelo, tengo que el campo eléctrico  $E$  vale:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \Rightarrow \sigma = \epsilon E = (8,85 \times 10^{-12}) (120) = 1,06 \times 10^{-9} \text{ C/m}^2$$

en el que se tomara la permitividad del aire  $\epsilon$  igual a la del vacío ( $\epsilon_0$ ).

Como el campo eléctrico es entrante, entonces corresponde a carga eléctrica negativa. Modelo a la Tierra como una esfera, y tomando un radio de medio de 6371 km.

$$Q = \sigma A = 4\pi R^2 \sigma = 4\pi (6,371 \times 10^6)^2 (1,06 \times 10^{-9}) = 5,42 \times 10^5 \text{ C}$$

$$\sigma = \epsilon E = 1,06 \times 10^{-9} \text{ C/m}^2 \quad Q = -5,4 \times 10^5 \text{ C} \quad (\text{carga negativa})$$

b) Tomo como densidad de corriente el valor medio:  $J = 3,00 \times 10^{-12} \text{ A/m}^2$

La corriente total vale:

$$I = J \cdot A = J \cdot 4\pi R^2 = (3,00 \times 10^{-12}) 4\pi (6,371 \times 10^6)^2 = 1,53 \times 10^3 \text{ A}$$

La carga total  $Q$  se descargaría en un tiempo  $t$ :

$$t = \frac{Q}{I} = \frac{5,42 \times 10^5}{1,53 \times 10^3} = 354 \text{ s.}$$

**$I = 1.530 \text{ A}$     $t = 354 \text{ s}$    La Tierra se descargaría en menos de 6 minutos!**

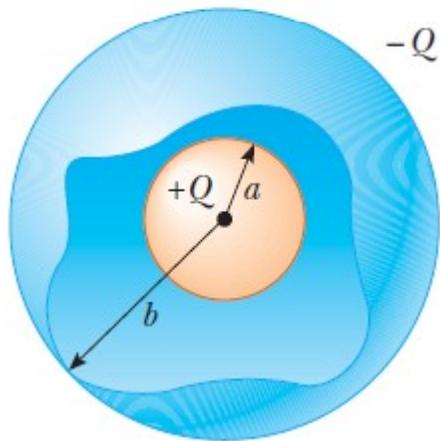
c) Se producen entre 40 y 100 rayos en cada segundo, que transportan una carga de -20 C.

$$I_{\text{rayos mínimo}} = \dot{n}Q = 40 \frac{1}{s} (20 \text{ C}) = 800 \text{ A}$$

$$I_{\text{rayos máxima}} = \dot{n}Q = 100 \frac{1}{s} (20 \text{ C}) = 2000 \text{ A}$$

Los rayos están transfiriendo una corriente equivalente de 800 a 2000 A hacia la Tierra que compensa la corriente de buen tiempo que "escapa" de la misma.

d) Para buen tiempo realizo un modelo de capacitor esférico. Habíamos visto que:



$$C = \frac{ab}{k_E (b - a)}$$

$$C = \frac{ab}{k_E (b - a)} = \frac{4\pi\epsilon_0 ab}{(b - a)} = \frac{4\pi\epsilon_0 R(R + d)}{d}$$

$$\frac{4\pi(8,85 \times 10^{-12})(6371 \times 10^3)(6421 \times 10^3)}{50 \times 10^3} = 9,10 \times 10^{-2} \text{ F}$$

Si modelo a la Tierra como un capacitor plano:

$$C_{plano} = \epsilon \frac{A}{d} = \epsilon \frac{4\pi R^2}{d} = (8,85 \times 10^{-12}) \frac{4\pi(6,371 \times 10^6)^2}{50 \times 10^3} = 90,3 \times 10^{-3} \text{ F}$$

Con ambos modelos obtengo que la capacitancia vale aprox.: **C = 9,0 × 10<sup>-2</sup> F**

Sin embargo, esto es una sólo una estimación, considerando que el medio entre las placas es aislante, lo cual sabemos que no lo es, ya que hay una corriente continua entre las placas...

Otra estimación que se podría hacer es a partir que la Q sobre la superficie de la Tierra ( $5,4 \times 10^5 \text{ C}$ ) y el  $\Delta V$  entre la superficie y la electrósfera (200 a 500 KV), tendríamos que  $C=Q/\Delta V$  sería del orden 2,7 a 1,1 F

La ventaja del modelo plano, es que me permite usarlo para la situación de mal tiempo, ya que la tormenta es local.

Podemos usar los datos correspondiente a la tormenta: valor del campo eléctrico, distancia de la nube a la superficie, área de la nube...

