

ANUNCIOS

Clase de consultas: por zoom los lunes a las 17:30 (antes de la clase del teórico virtual que empieza a las 18:00).
Enlace el mismo que para el teórico virtual.



PREGUNTAS RÁPIDAS

¿VERDADERO O FALSO?

- 1) La resistencia equivalente de dos resistencias en paralelo nunca puede ser menor que la menor de ellas.
- 2) En un nodo, la suma de corrientes que entran es igual a la suma de corrientes que salen.
- 3) Un cortocircuito ideal en paralelo con una resistencia anula la resistencia equivalente del circuito.
- 4) Una bombilla de 60 W siempre consume 60 W, sin importar el voltaje aplicado.
- 5) Un voltímetro tiene una resistencia interna muy alta para no alterar la corriente del circuito



PREGUNTAS RÁPIDAS

1) Al agregar una nueva resistencia en paralelo a un circuito ya existente:

- a) La corriente total disminuye
- b) La resistencia equivalente disminuye
- c) La resistencia equivalente aumenta
- d) La tensión en cada rama cambia
- e) Ninguna de las anteriores.

2) Si una lámpara está diseñada para 220 V y se conecta a 110 V:

- a) Consumirá más potencia
- b) Se quemará inmediatamente
- c) Consumirá menos potencia
- d) No funcionará en absoluto
- e) Ninguna de las anteriores.



8-CORRIENTE, RESISTENCIA Y FUERZA ELECTROMOTRIZ

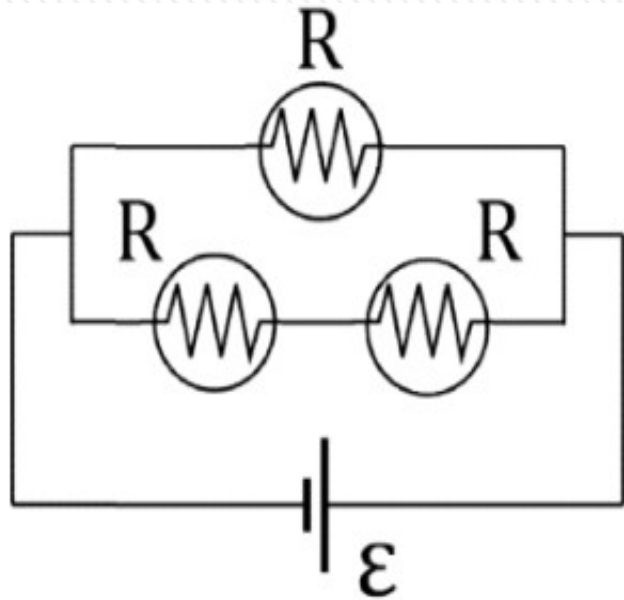


Dos lamparillas de luz: de igual potencia de salida lumínica, pero la lámpara fluorescente de la izquierda, produce esta iluminación con mucho menos potencia eléctrica que la incandescente de la derecha. Las lámparas fluorescentes (“de bajo consumo”), es menos costosa de operar, pues consume menos potencia y resulta más económica.



Líneas de transmisión eléctrica transportan energía a hogares e industrias. La energía se transfiere a un voltaje muy elevado, hasta de cientos de miles de volts. Si bien es peligroso, el elevado voltaje origina una menor pérdida de energía, debido a la resistencia en los alambres.

EJEMPLO: Ejercicio 2.1.16



2.1.16- Primer parcial 2021- Se conectan tres lámparas incandescentes idénticas a una fuente de potencial ideal que proporciona una diferencia de potencial de 120 V. Los filamentos de las lámparas están fabricados con tungsteno, $\rho = 5,60 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ y tienen una sección transversal circular de radio $2,50 \times 10^{-5} \text{ m}$. Si la potencia entregada por la fuente vale $1,30 \times 10^3 \text{ W}$, ¿cuál es el largo del filamento que compone a las lámparas?

Nos dan la potencia P que entrega la fuente, como para un circuito con una resistencia $P = V^2/R_{eq}$ debo calcular la resistencia equivalente del circuito, constituido por un acoplamiento en paralelo de una resistencia R con otras dos resistencia R colocadas en serie (de valor total $2R$).

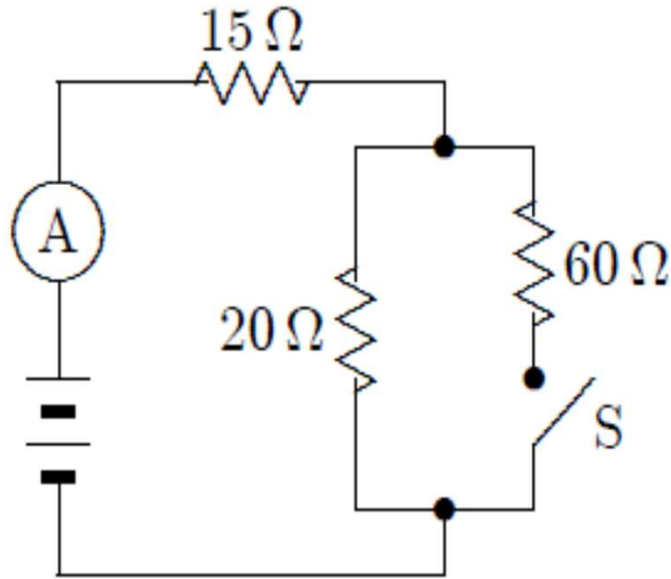
$$R_{eq} = \frac{R \cdot 2R}{R + 2R} = \frac{2R^2}{3R} = \frac{2}{3}R \quad R = \rho \frac{L}{A} = \rho \frac{L}{\pi r^2} \quad P = \frac{V^2}{R_{eq}}$$

$$P = \frac{V^2}{\frac{2}{3}R} = \frac{3V^2}{2R} = \frac{3}{2} \frac{V^2}{\left(\rho \frac{L}{\pi r^2}\right)} = \frac{3}{2} V^2 \frac{\pi r^2}{\rho L} \quad L = \frac{3}{2} V^2 \frac{\pi r^2}{\rho P}$$

$$L = \frac{3}{2} (120)^2 \frac{\pi (2,50 \times 10^{-5})^2}{(5,60 \times 10^{-8})(1,30 \times 10^3)} = 0,58258 \text{ m}$$

$$L = 0,583 \text{ m} = 58,3 \text{ cm}$$

EJEMPLO: Ejercicio 2.1.10



Cuando el interruptor S está abierto, el amperímetro del circuito mostrado en la figura indica 2,00 A, y la potencia que entrega la batería vale P_0 .

Si se cierra el interruptor S, la potencia que entrega la batería vale P_F . ¿Cuánto vale el cociente entre la potencia final y la potencia inicial: P_F / P_0 ?

Con S abierto, la corriente vale 2,00 A y la resistencia equivalente (total) del circuito vale 35,0 Ω , por lo tanto la batería tiene un $\Delta V = I \cdot R_{\text{total}} = 2,00 \text{ A} \times 35,0 \Omega = 70,0 \text{ V}$

Por lo tanto la potencial inicial entregada por la batería vale

$$P_0 = \Delta V \cdot I = 70,0 \text{ V} \times 2,00 \text{ A} = 140 \text{ W}$$

Cuando se cierra S, las resistencias de 20,0 Ω y 60,0 Ω están en paralelo, el equivalente en paralelo vale:

$$R_{eq.par.} = \frac{20,0 \times 60,0}{20,0 + 60,0} = 15,0 \Omega$$

Esta resistencia equivalente queda en serie con la de 15,0 Ω , por lo que la resistencia equivalente total con S cerrado vale: $R_{\text{total}} = 15,0 \Omega + 15,0 \Omega = 30,0 \Omega$

La potencia final entregada por la batería la podemos calcular como:

$$P_{\text{final}} = \frac{(\Delta V)^2}{R_{\text{total}}} = \frac{70,0^2}{30,0} = 163,33 \text{ W}$$

$$\frac{P_{\text{final}}}{P_{\text{inicial}}} = \frac{163,33}{140} = 1,167$$

$$\mathbf{P_F / P_0 = 1,17}$$

Seguridad Eléctrica

Peligros de la Electricidad

Sufrir una descarga eléctrica (electrocución): flujo de corriente que pasa a través del cuerpo de la persona.

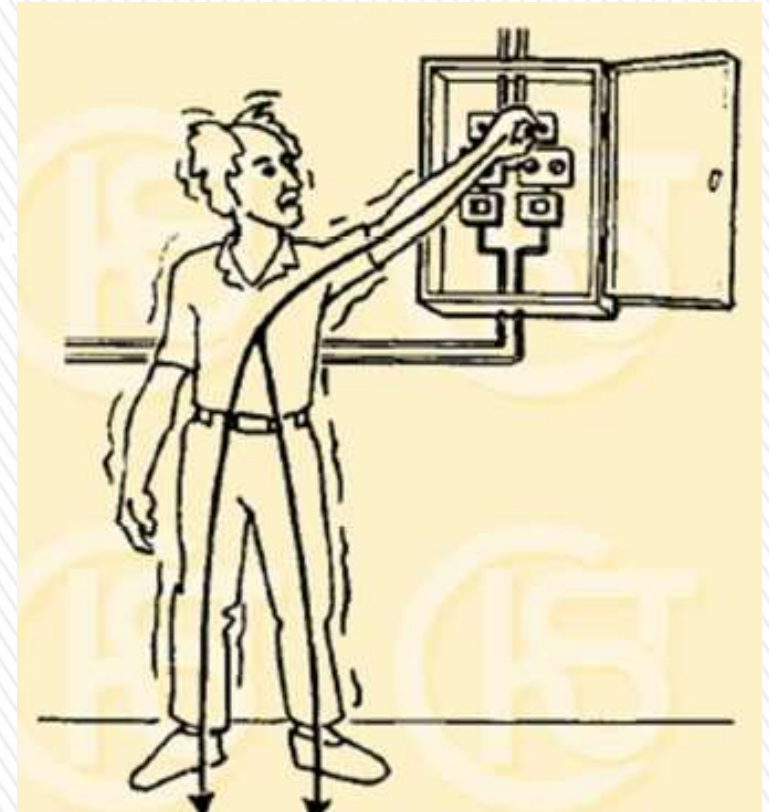
Ocurrir un arco eléctrico: descarga de corriente entre dos elementos a través de un espacio compuesto por partículas ionizadas (plasma).

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. Resistencia del cuerpo
5. Tipo de corriente y frecuencia
6. Capacidad de reacción del organismo.

Piel seca: $100 \text{ K}\Omega/\text{cm}^2$

Piel húmeda: $1000 \text{ }\Omega/\text{cm}^2$



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)
> 4 A	Parálisis cardiaca (fatal)
>5 A	Quemadura del tejido (fatal, destruye órganos vitales)

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.



Muerte



Contrac. Muscular
Dific. respiratoria



Percepción.
No hay peligro

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 sistema¹⁰ eléctrico de la casa.



Seguridad Eléctrica –Cableado doméstico

UTE suministra **energía eléctrica alterna de 50Hz**, con baja tensión (< 1000V).

- 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



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**”.



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- **Disyuntor termo-magnético (Térmica)**
- 4- **Puesta o descarga a tierra**

Disyuntor: interruptor que actúa en forma automática



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

INTERRUPTOR TERMOMAGNÉTICO

Llave térmica: disyuntor compuesto por dos metales de distinto coeficiente de dilatación lineal. Cuando la corriente eléctrica sube, la temperatura del elemento se eleva produciendo una curvatura que interrumpe el circuito.

Llave magnética funciona con la fuerza de atracción ejercida por una bobina con núcleo de hierro. Cuando la intensidad de la energía se eleva da lugar a una fuerza que acciona un contacto móvil que abre el circuito cortando la energía.

Llave termomagnética: combinación de ambas. Por un lado, se encuentra un electroimán que funciona como llave magnética y por otro la lámina bimetálica que actúa como la llave térmica. Las dos partes están dispuestas en serie, por lo tanto, si uno de ellos detecta la suba de intensidad se corta el flujo de energía.

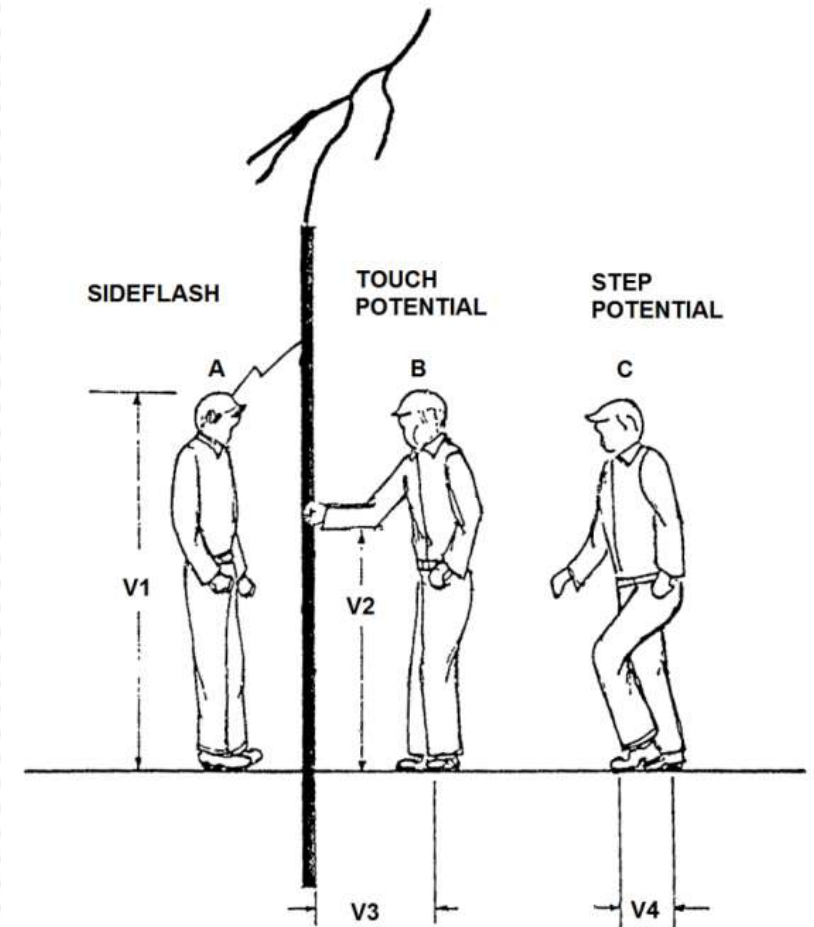


El disyuntor termomagnético protege al circuito eléctrico de sobrecargas, mientras que el disyuntor diferencial protege a las personas de sufrir un choque eléctrico.

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).



CAMPO ELÉCTRICO ATMOSFÉRICO

Características del campo eléctrico atmosférico

La atmósfera con buen tiempo tiene un campo eléctrico uniforme E vertical y entrante hacia la Tierra) de 60 a 200 V/m (típicamente de 100 a 120 V/m). Sin embargo este valor puede variar bastante, incluso puede llegar a cambiar en su sentido.

Presenta variaciones ligadas a cambios de la conductividad de las capas más bajas de la atmósfera y la actividad solar.

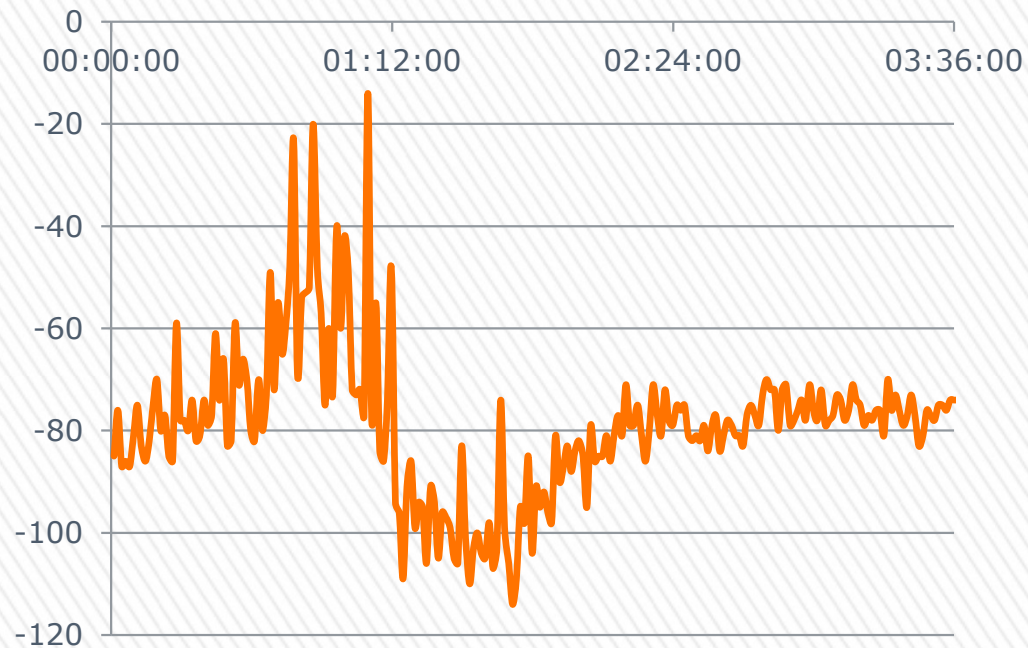
El campo eléctrico en condiciones perturbadas, y más aún de tormenta, tiene un valor y dirección variables, siendo muy afectado por las cargas de las nubes y por la concentración de partículas tales como aerosoles u otras provenientes de la contaminación.

Las variaciones del campo eléctrico en buen tiempo dependen de:

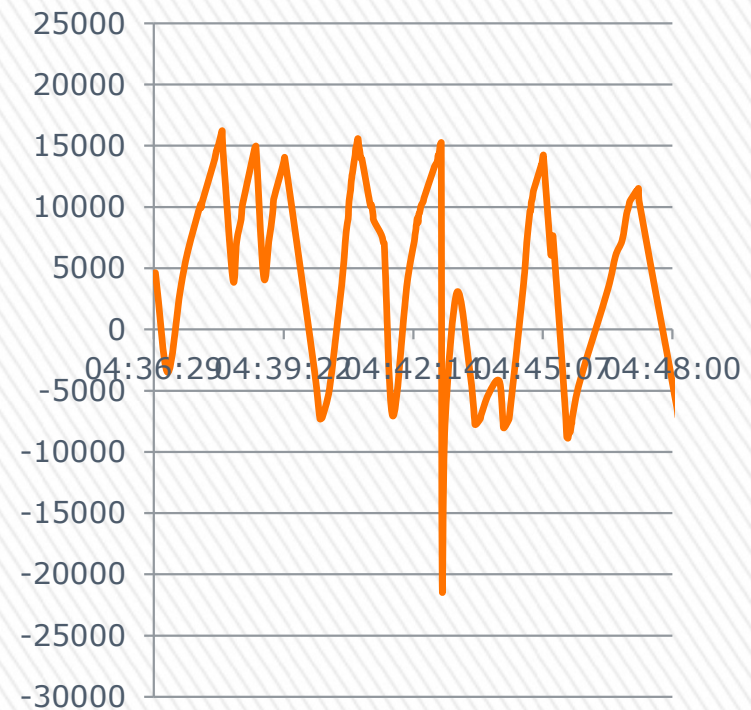
- ubicación geográfico (latitud y longitud),
- altitud,
- nubosidad y condiciones del tiempo (meteorológicas),
- concentración de aerosoles y actividades tecnológicas
- cambios diurnos y anuales debido a la actividad solar y de los rayos cósmicos.

CAMPO ELÉCTRICO ATMOSFÉRICO

Características del campo eléctrico atmosférico



Campo eléctrico con buen tiempo

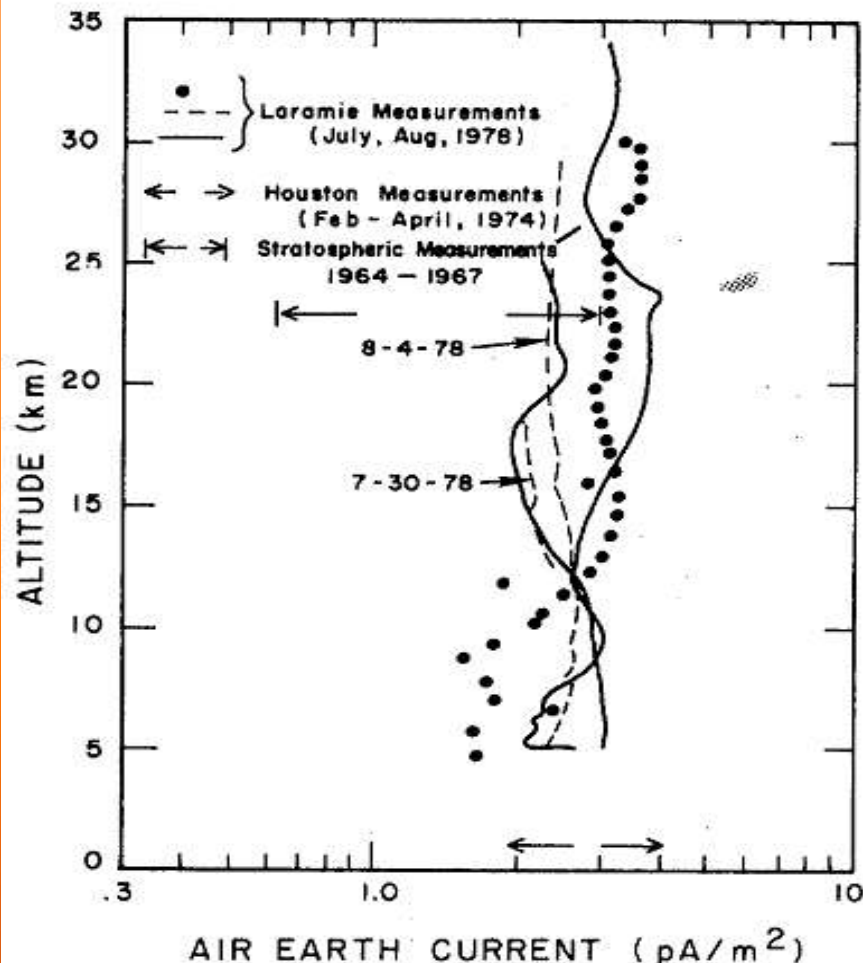


Campo eléctrico con proximidad de tormenta

Variación de E con la latitud:

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

CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA ATMOSFÉRICA



Variación de la densidad de corriente J en pA/m² con la altura

Conductividad eléctrica (σ) $J = \sigma E$
se viene expresa en $\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$.

Como hay una conductividad atmosférica y existe un campo eléctrico existe 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: **corriente neta aire-tierra.**

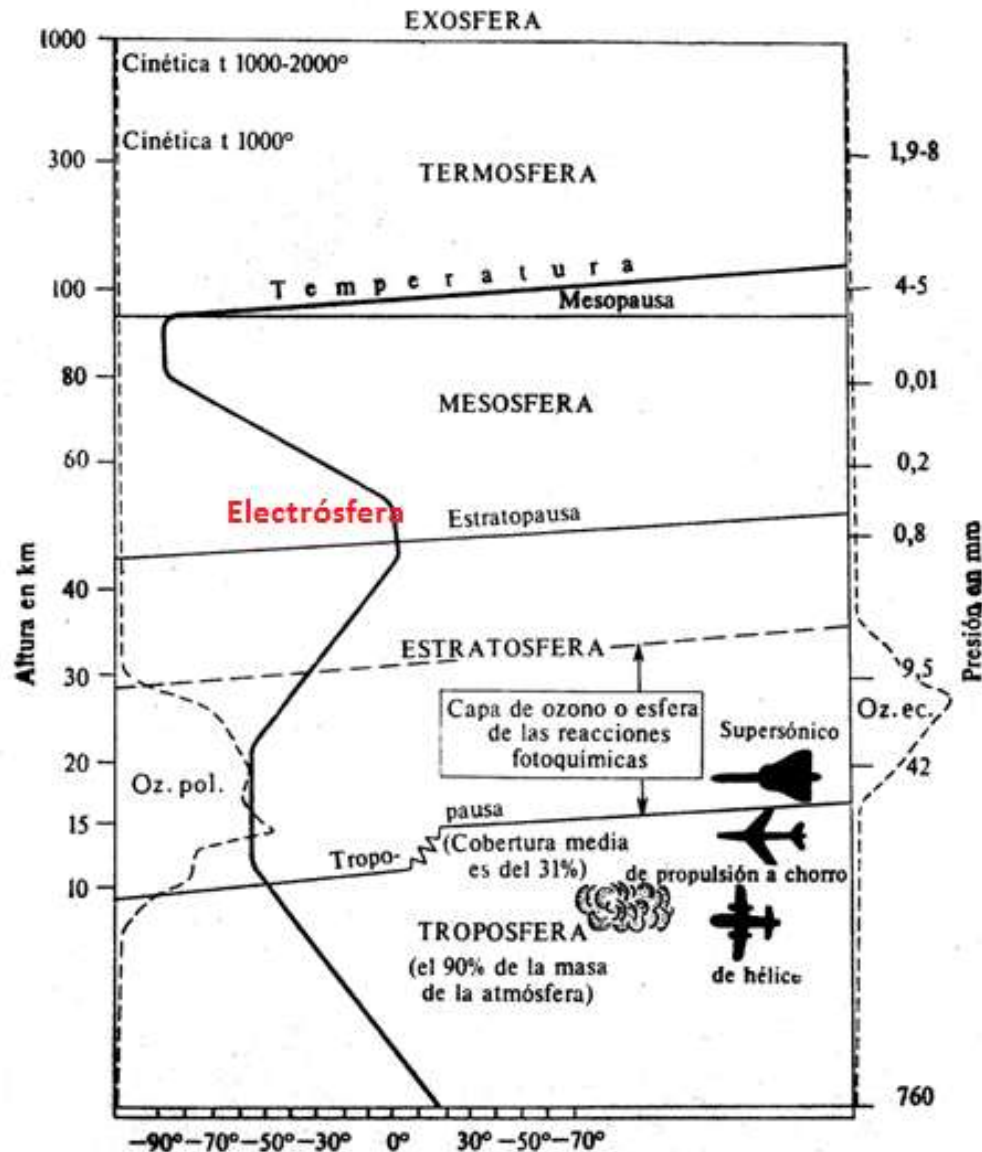
Varía a lo largo del día y del lugar.

DENSIDAD DE CORRIENTE ATMOSFÉRICA

Se puede considerar que la misma varía entre 1 y 4 pA/m² (es decir de 1 a 4×10^{-12} Am²).

Se puede asumir como valores medios: para los continentes 2,3 pA/m² para los mares 3,3 pA/m².

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.*

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

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 ± 5 rayos

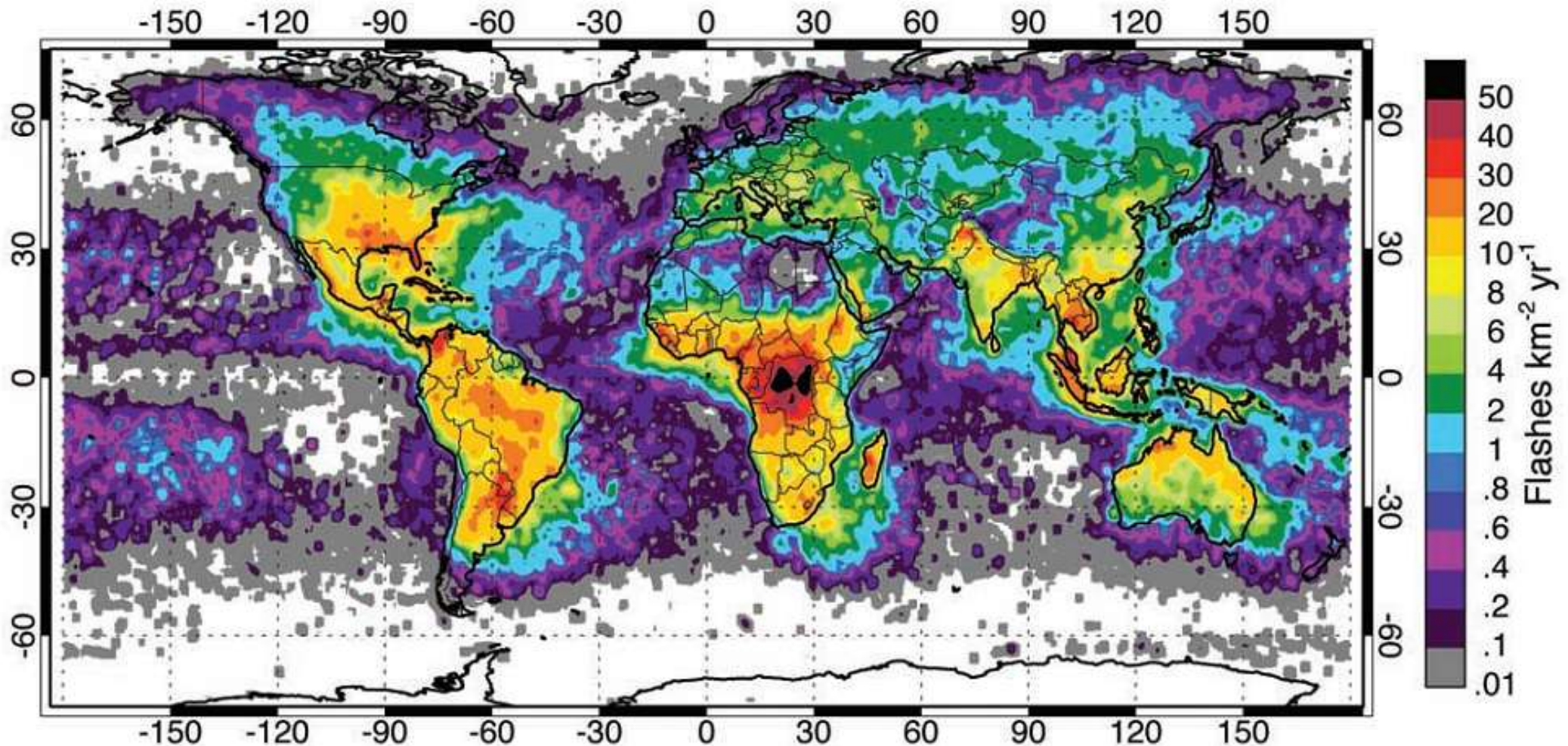
Alrededor de 2.000 personas al año fallecen por una descarga directa

Descargas atmosféricas



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 ² .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.

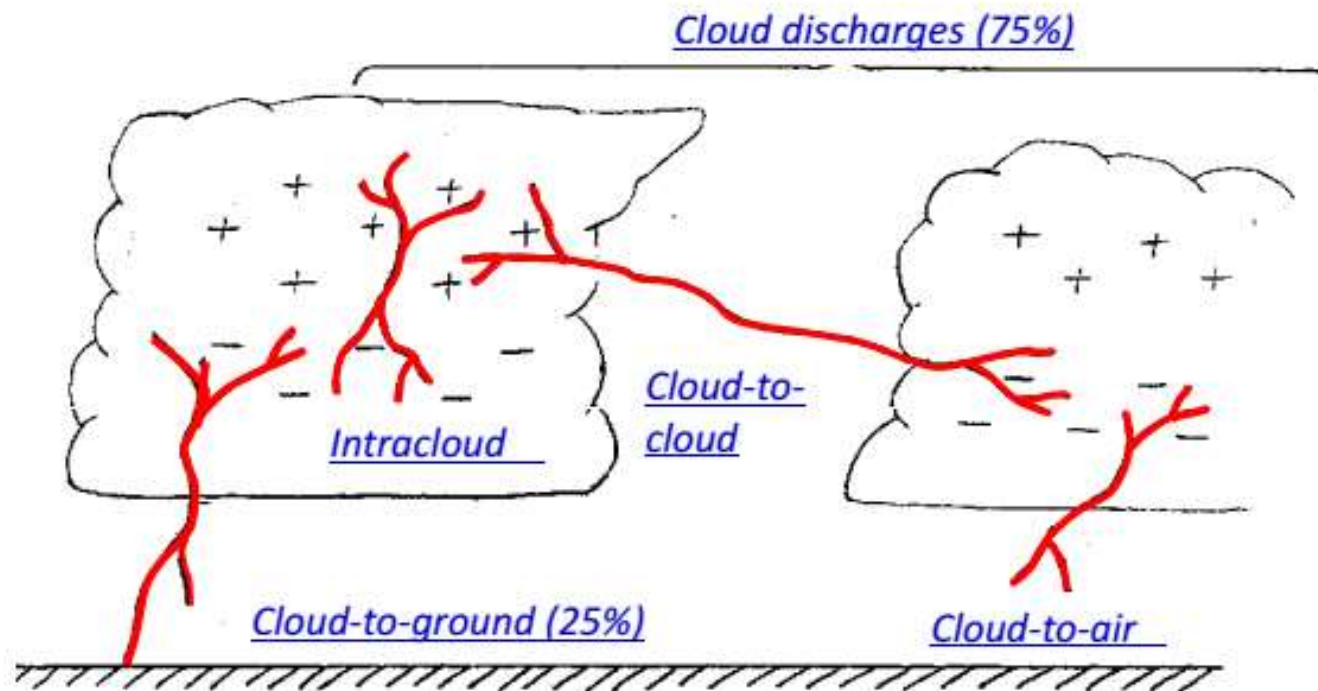
En Uruguay se estimaba 5 rayos/(año.km²)

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

NUBE-AIRE (C-A)



TIPOS DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

INTRA-NUBE



TIPOS DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

NUBE-TIERRA (C-G)



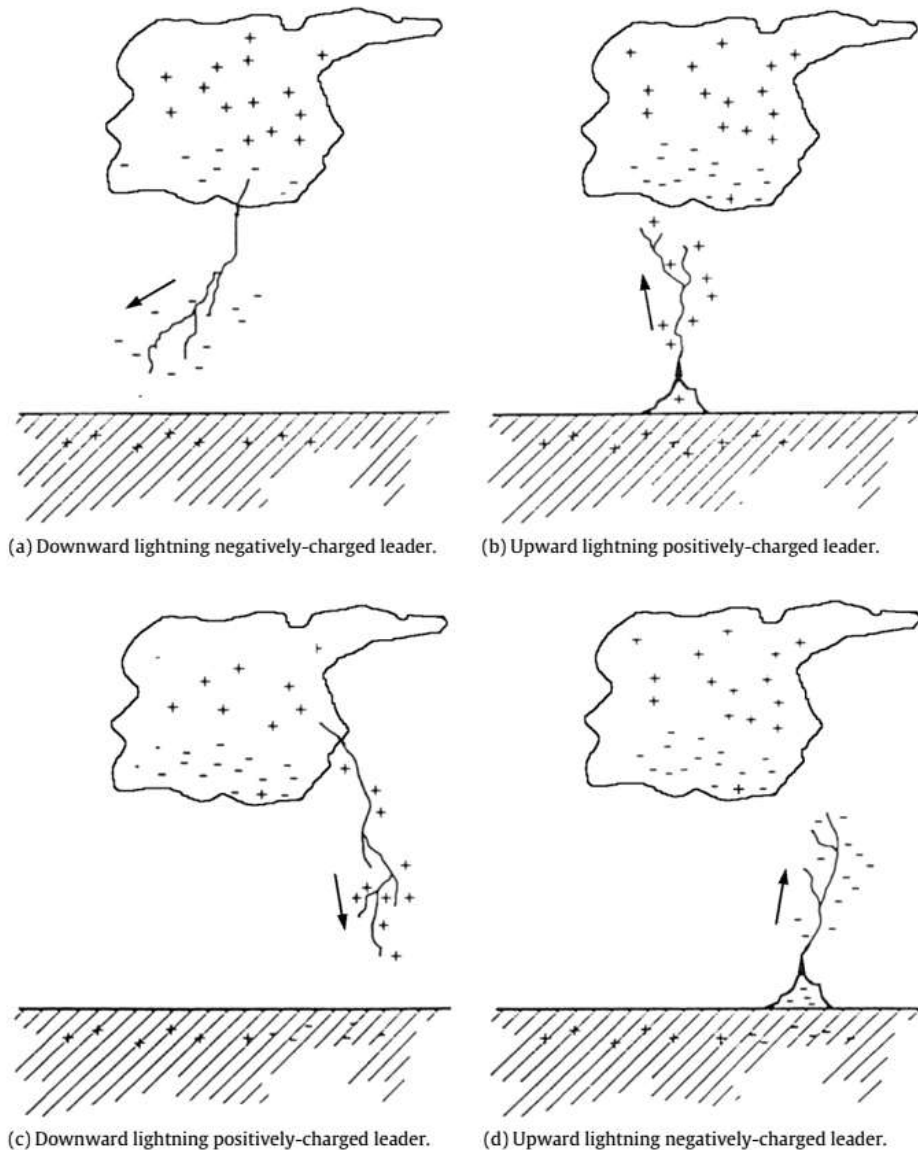
TIPOS DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

NUBE-NUBE (C-C)



TIPOS DE RAYOS

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



1
Dentro de las descargas entre nube y tierra existen cuatro tipos de rayos dependiendo del sentido 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].



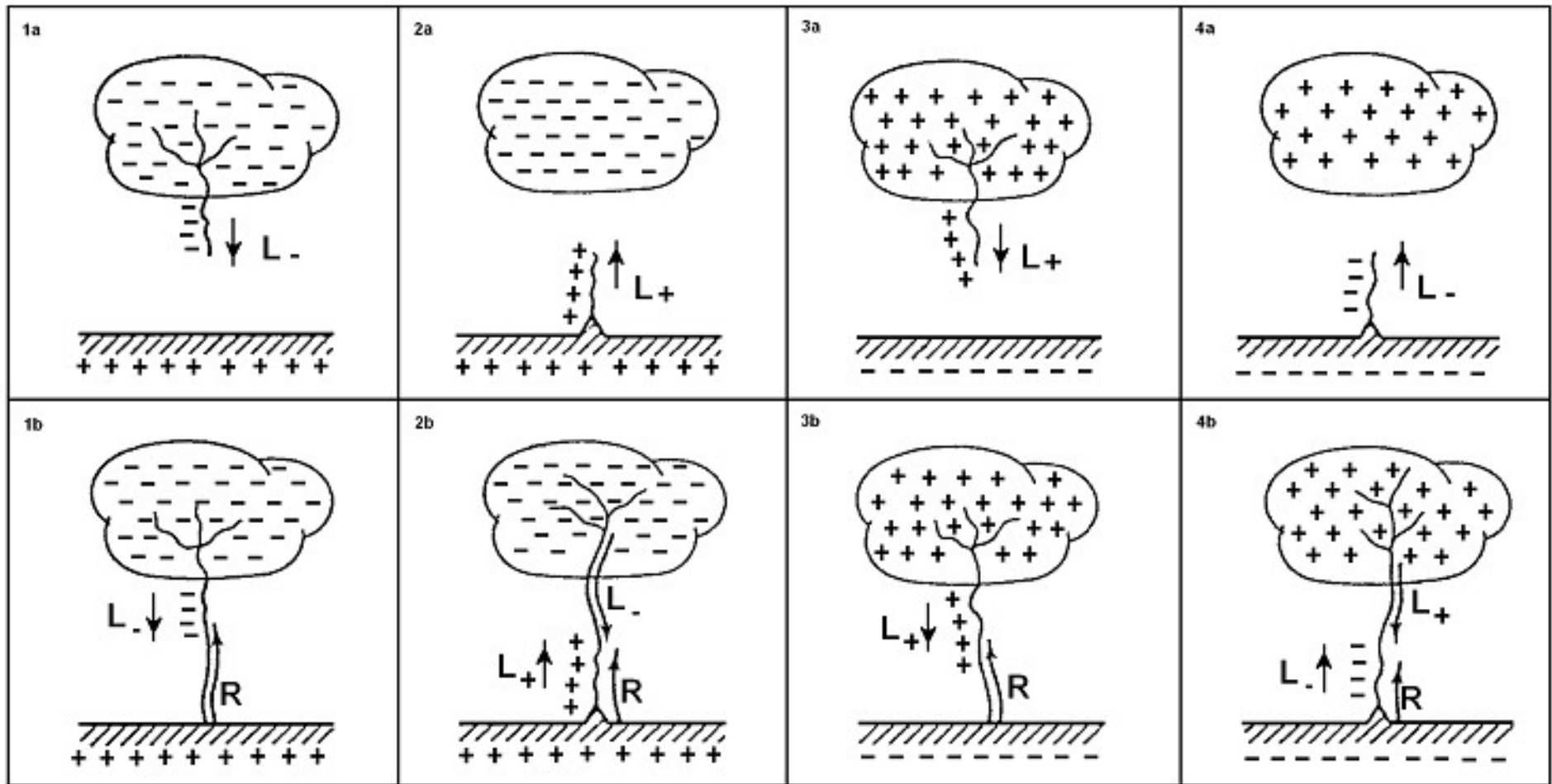
TIPOS DE RAYOS

-CG (90%)

+GC

+CG (10%)

-GC



a) Guías, b) Descargas de retorno



VALORES REPRESENTATIVOS DE LAS MAGNITUDES FÍSICAS DE LAS DESCARGAS

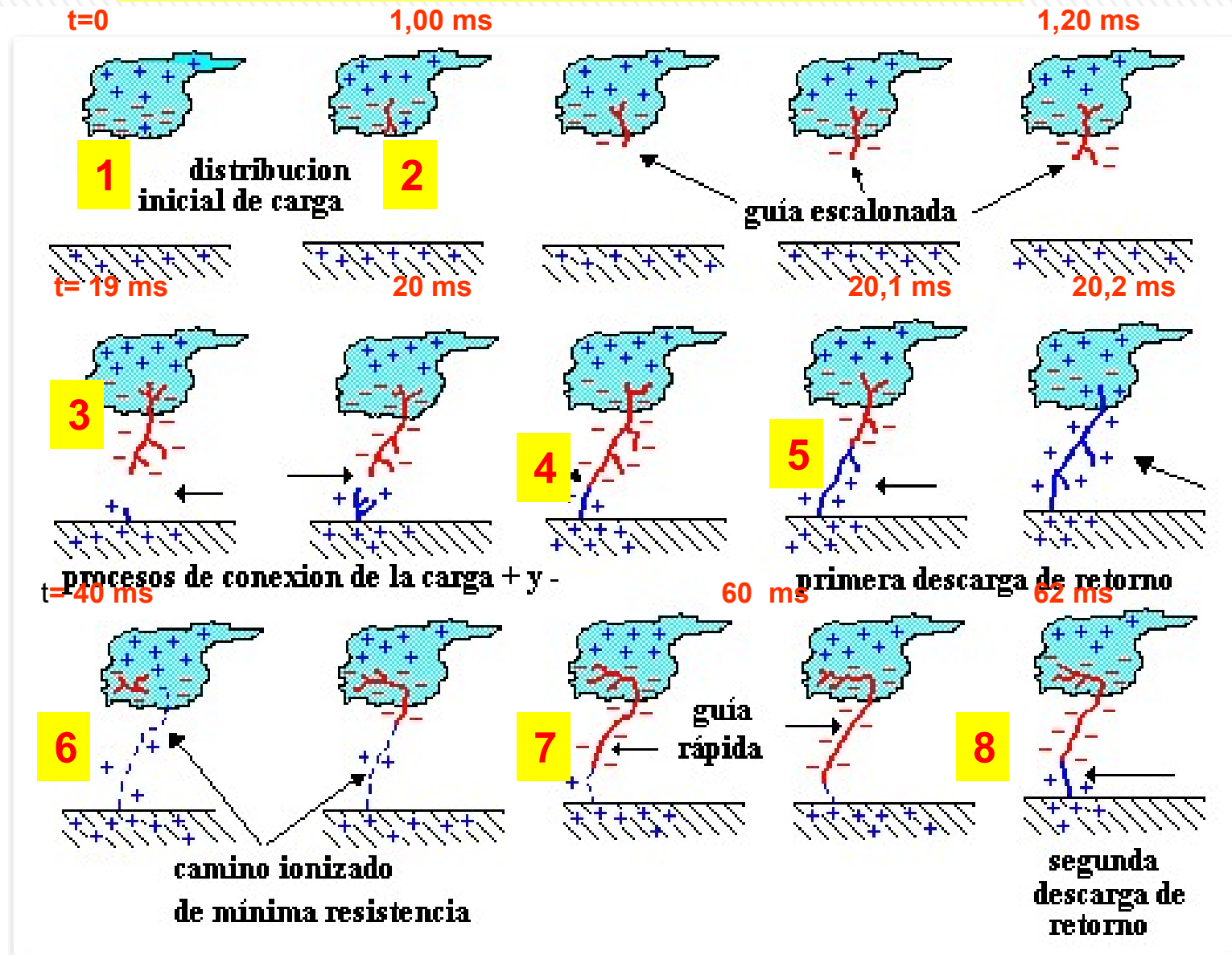
DESCARGA COMPLETA

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 (μs)	>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

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: $1 \mu s$; $I = 100$ a $1000 A$, $V = 10^6$ a 10^7 m/s, propagación: 50 a 100 m; tiempo de espera: $50 \mu s$. 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 3×10^5 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. 3×10^6 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 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)



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



EJEMPLO: Ejercicio 2.1.21

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 $40\text{-}60 \text{ km}$ 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**.

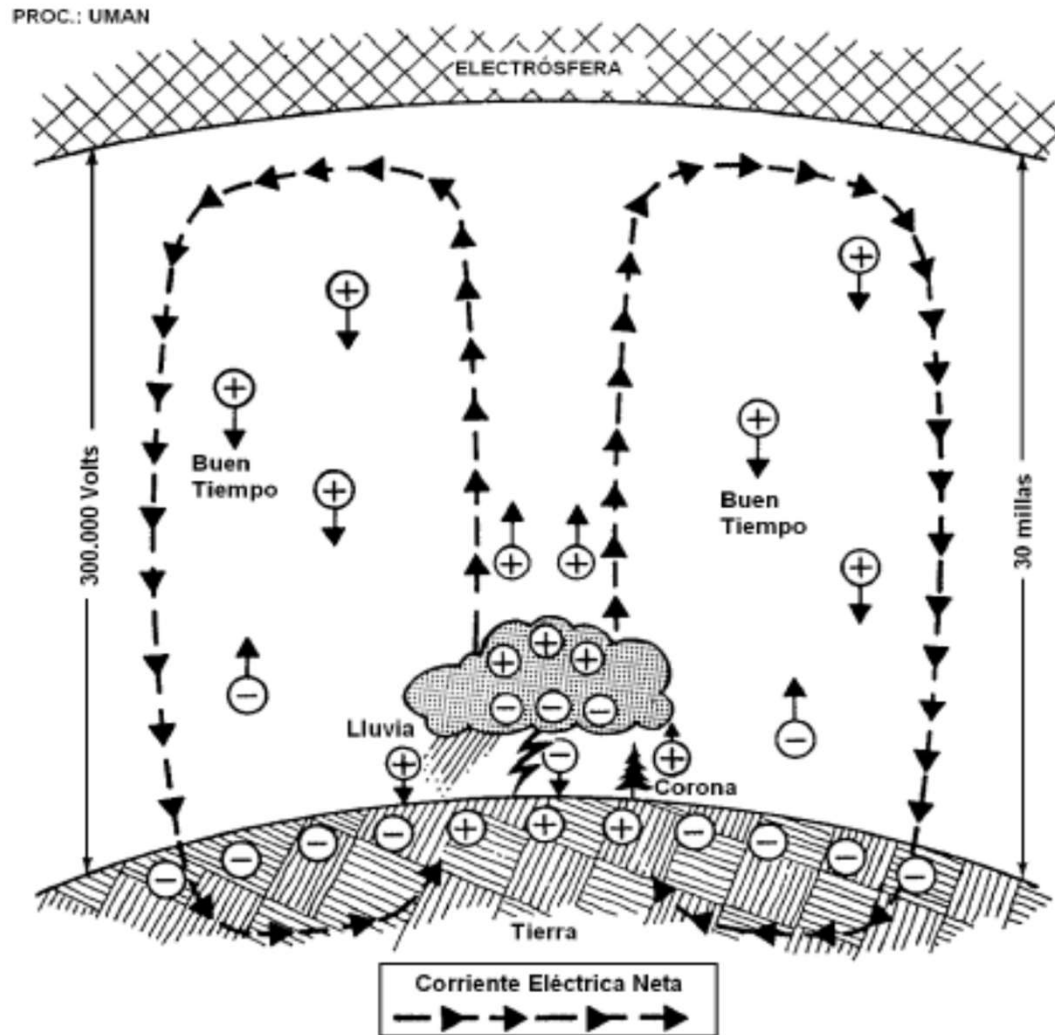
La diferencia de potencial entre la superficie terrestre y la electrósfera es de 200 a 500 KV , con un valor medio de 300 KV).

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 $4,00 \text{ pA/m}^2$.

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.

EJEMPLO: Ejercicio 2.1.21



a) A partir del campo eléctrico sobre la superficie terrestre con buen tiempo, determina la densidad superficial de carga σ , 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?