

Capítulo IV

4. Características Típicas da estrutura de cargas em tempestades:

- a) As cargas negativas usualmente se concentram na parte inferior das tempestades. Tipicamente em temperaturas maiores que -25°C e às vezes maiores que -10°C ;
- b) As cargas positivas estão situadas tipicamente acima da região de cargas negativas. Evidências experimentais suportam que se concentram na região superior das tempestades e na bigorna (“anvil”);
- c) Diferentes polaridades de carga podem existir ao longo de uma região.;
- d) Perfis verticais do campo elétrico vertical (E_z) indicam mais de 3 regiões de cargas (modelo tripolo);
- e) Camadas de blindagem geralmente existem nas bordas da nuvem, em especial no topo das nuvens;
- f) A maioria dos íons pequenos que são inseridos na parte baixa das tempestades é produzida por pontos de descarga, ex: arvores, grama, antenas e etc;
- g) Em geral, as gotas de chuva transportam cargas positivas para baixo da nuvem. As cargas de chuva próximas da superfície são afetadas significativamente pelos íons produzidos pelos pontos de descarga.

4.1 Fluxo de Corrente em Tempestades:

- a) Correntes a partir do topo da nuvem:
 - Wilson em 1920 propôs: Fluxo de corrente do topo das tempestades para a alta atmosfera adiciona corrente de bom tempo (circuito elétrico global). Esta condução ocorre devido a resposta que os íons pequenos reagem ao Campo Elétrico da carga positiva resultante no topo da tempestade;
- b) Corona ou ponto de descarga:
 - Corrente de corona é criada a partir da quebra/ionização do ar na presença de um Campo Elétrico alto, próximo a pontos condutores abaixo da tempestade (grama, arvores, postes, antenas, etc.)
- c) Correntes de Precipitação
- d) Relâmpagos

e) Correntes de Maxwell

- Krider e Massur, 1982, propõe o cálculo do fluxo total de corrente em tempestades a partir das medidas da densidade de corrente de Maxwell.

4.2 Conceitos Básicos de Nuvens Eletrificadas:

→ Os conceitos são baseados em observações experimentais e medidas de laboratório

4.2.1 Teorias de Eletricidade

- As cargas devem ser inseridas nos hidrometeoros, logo a sua capacidade de se mover sob a ação de uma força elétrica é drasticamente reduzida.
- As cargas devem estar dispostas sobre os hidrometeoros, e tem a habilidade de se mover sob a presença de um Campo Elétrico;
- Cargas de uma polaridade devem se manter isoladas das cargas de sinal oposto ou serem transportadas pelo vento ou gravidade para criarem regiões de cargas resultantes

A capacidade limite da superfície do hidrometeoro de resistir à força elétrica, restringe a quantidade de cargas que se colocam em um hidrometeoro. Quando a força elétrica que sai da superfície da gota é igual a tensão superficial da gota, o hidrometeoro pode se quebrar a parte (limite de Rayleigh)

Ou seja,

$F_e/\text{Area} = \text{Pressão interna da gota} = 2\sigma/r$, onde σ é a tensão superficial da gota.

Logo,

$$q = 8\pi\sqrt{\epsilon\sigma}r^3$$

4.2.1.1 Mecanismos de carregamento de cargas:

A existência ou não de um Campo Elétrico para polarizar os hidrometeoros:

- a) Mecanismo Indutivo: Sob a ação de um Campo Elétrico pré existente os hidrometeoros se polarizam, e induzem cargas sobre a superfície do hidrometeoro.

Um hidrometeoro não carregado inicialmente, sob a ação de um campo elétrico, pode induzir cargas de polaridade oposta na superfície do hidrometeoro, logo o hidrometeoro torna-se polarizado.

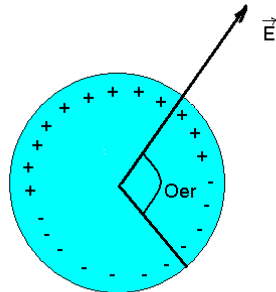


Figura 17 Polarização de um hidrometeoro sob a presença de uma campo elétrico.

- b) Mecanismo Não Indutivo: não precisa de um Campo Elétrico;
- c) Mecanismo de Captura de Íons: Íons gasosos são capturados por hidrometeoros; Este processo pode distribuir as cargas de um sinal sistematicamente em diferentes regiões de uma tempestade. Dessa maneira, as regiões afetadas podem ter uma carga resultante sem a necessidade de ter movimentos adicionais no hidrometeoro.
- d) Mecanismo Indutivo de Partícula-partícula: Interação a partir da colisão de partículas/hidrometeoros ou quebra de pequenas partículas sob a superfície de um hidrometeoro. Já que cargas iguais e opostas ficam depositadas nos hidrometeoros, temos que a medida que elas interagem e se separam, estas regiões permanecem eletricamente neutras até que os hidrometeoros carregados negativamente começam a se mover dos carregados positivamente. Além disso, as forças de gravidade e empuxo, devem agir para que este mecanismo se torne importante na eletrificação das tempestades. Para ser efetivo, esta hipótese propõe que os hidrometeoros tenham velocidades terminais de queda diferentes (se aproximando da teoria de precipitação).

4.2.1.2 Forças que afetam o movimento dos hidrometeoros carregados

Os hidrometeoros se movem sob a influência de forças:

- Elétrica: atração ou repulsão;

- Gravidade e;
- Convecção (correntes ascendentes/descendentes);

As forças elétricas são muito inferiores que a força gravitacional e convecção, mas em regiões de grande campo elétrico ($> 100 \text{ kV/m}$) a aceleração elétrica sob pequenos hidrometeoros \sim Força da gravidade;

4.2.2 Propriedades elétricas da água:

4.2.2.1 Estrutura Molecular:

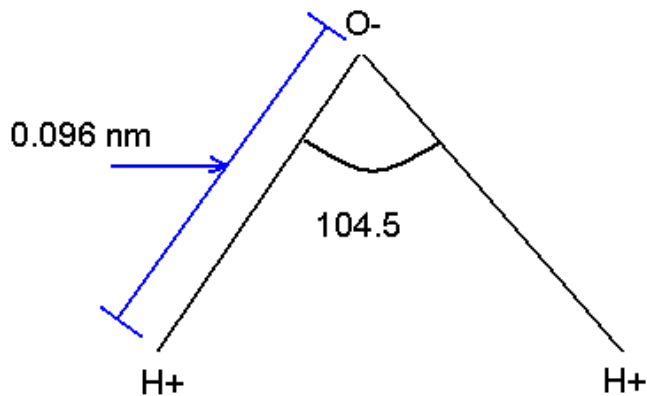


Figura 18. Estrutura angular de uma molécula de água.

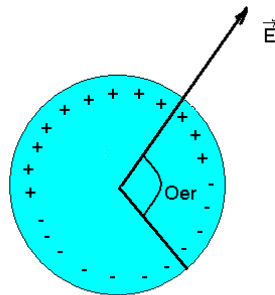
A água tem momento de dipolo permanente ($p = 6.18 \times 10^{-30} \text{ cm}$), e é conhecida como uma molécula polar. A distribuição de elétrons resulta em cargas (+) nos núcleos de Hidrogênio e negativa no de Oxigênio. A geometria molecular é angular e não linear. Caso a molécula fosse linear, o momento de dipolo seria igual a ZERO.

Sob a ação de um Campo Elétrico as moléculas se alinham e formam um dielétrico. Isto implica em uma redução do Campo Elétrico interno do hidrometeoro e um aumento fora dele.

Em dielétricos: as cargas polarizadas se aglutinam
Em condutores: induz-se uma carga na superfície;

Como a molécula de H₂O tem um momento de dipolo permanente, um campo elétrico externo tem a alinhar as moléculas, apesar que agitações térmicas inibam um perfeito alinhamento.

No hidrometeoro, o parcial alinhamento causa um excesso de q- na superfície de um lado e um excesso de q+ no lado oposto da superfície ao longo da direção do campo elétrico. Quando isso ocorre a molécula é dita como polarizada. Logo no caso da água, temos um dielétrico polar.



O efeito de polarização é o de reduzir o campo elétrico dentro do hidrometeoro e aumentar fora dele, logo a densidade de corrente σ_q induzida na superfície de um condutor esférico sob a ação de um campo elétrico constante é

$$\sigma_q = 3\epsilon |\vec{E}| \cos \theta_{E,r}$$

Onde $\theta_{E,r}$ é o ângulo formado pelo vetor do campo elétrico a partir da superfície aonde se quer calcular. ϵ é a constante dielétrica.

Para um dielétrico temos

$$\sigma_q = 3\epsilon \left(\frac{\epsilon_{diel} - 1}{\epsilon_{diel} + 2} \right) |\vec{E}| \cos \theta_{E,r}$$

Mas como $\epsilon_{dielétrico}$ da água é grande (x 80), gotas de água são comumente tratadas como condutores quando se considera um indução de cargas pela presença de uma força elétrica. Logo

$$\sigma_{qdielétrico} = \sigma_{qcondutor}$$

Se integramos a densidade de corrente sobre um hemisfério, temos

$$q = \sigma_q Area = \int \sigma_q d\theta d\phi r dr$$

Logo

$$q = 3\pi\epsilon |\vec{E}| r^2$$

4.2.2.2 Camada Elétrica Dupla

→ Esta hipótese assume que existe uma dupla camada elétrica (dipolar) entre as interfaces da água e o ar, gelo e ar ou gelo e água:

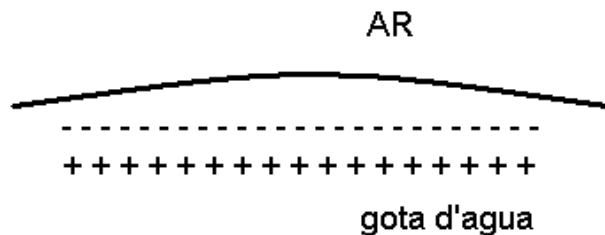


Figura 18. Camada elétrica dupla formada por uma gota d'água e o ar.

Fletcher (1968, 1962) concluiu que era termodinamicamente uma vantagem para as moléculas serem orientadas com seus vértices negativos para fora na superfície da água pura com o ar.

Em termos de superação de cargas entre as gotas, temos que na maior parte delas, mais cargas da região externa são removidas da camada dupla do que as internas. Portanto existe um excesso de cargas internas que está sendo deixado.

4.2.2.3 Mecanismos que causam a separação de cargas entre as gotas:

- Por exemplos se temos bolhas de CO_2 no líquido ou no gelo, e uma bolha emerge para a superfície e se rompe, gotículas que escapam levarão as cargas da parte mais externa da camada, deixando então um excesso de cargas residindo na parte interior.
- Um outro mecanismo ocorre quando 2 superfícies de gelo com diferentes propriedades são esfregadas. Se uma partícula raspa mais cargas da camada superior do que a camada inferior da outra partícula, uma carga resultante poderá ser transferida da camada externa.

- Em 1860, Faraday sugeriu que a interface gelo-ar agia como se fosse uma camada fina de água quase-líquida sobre uma partícula de gelo. Mais tarde Baker e Dash (1994) sugerem que as partículas iriam trocar material desta camada se a espessura das camadas das 2 partículas fosse diferente, com a massa fluindo da camada mais espessa para a mais fina e a carga poderia ser transferida durante esta troca de massa por causa da camada dupla.
- A massa tenderá a fluir da superfície mais quente para a mais fria, de regiões com curvaturas superficiais altas e de regiões com crescimento de vapor alto para com baixo crescimento ou evaporação.

4.2.2.4 Efeito Termo-Elétrico:

Na água algumas moléculas se separam em Cátions H^+ e Anions OH^- . Se estes elementos têm diferentes mobilidades, eles terão diferentes taxas de difusão ao longo de um gradiente térmico. Portanto existirá uma separação de cargas de acordo com o gradiente de temperatura imposto. Apesar da mobilidade do H^+ ser maior que o OH^- , já que o H^+ tem menor massa, isso não é geralmente aplicado para a água líquida

Na fase líquida, esta mobilidade é muito pequena, entretanto no gelo a mobilidade do Cátion (H^+) é muito maior que a do Anion. (OH^-) Portanto, se houver um gradiente de temperatura ao longo de um pedaço de gelo, os íons H^+ se difundirão mais rápido para a parte mais fria do gelo, deixando uma resultante de cargas negativas na região mais quente.

Medidas de laboratório prevêm que a diferença de potencial ao longo de um gradiente de temperatura posser ser $2dTmV$, dT é a diferença de temperatura ao longo de dx . A separação máxima de carga ocorre entre 5-10 milisegundos. Logo supondo uma diferença de $2^\circ C$, tem-se 4 mV.

O efeito termo-elétrico no gelo é relativamente demorado para as escalas relevantes para a colisão de partículas e possivelmente não é um fator se as partículas trocam cargas durante a colisão.

Basicamente temos que pensar como um acoplamento entre o efeito termo-elétrico auxiliado pelas colisões. Dessa maneira podemos considerar os dois exemplos abaixo:

a) Considere um granizo e ou um graupel caindo em uma nuvem com água super-resfriada e pequenos cristais de gelo, figura abaixo:

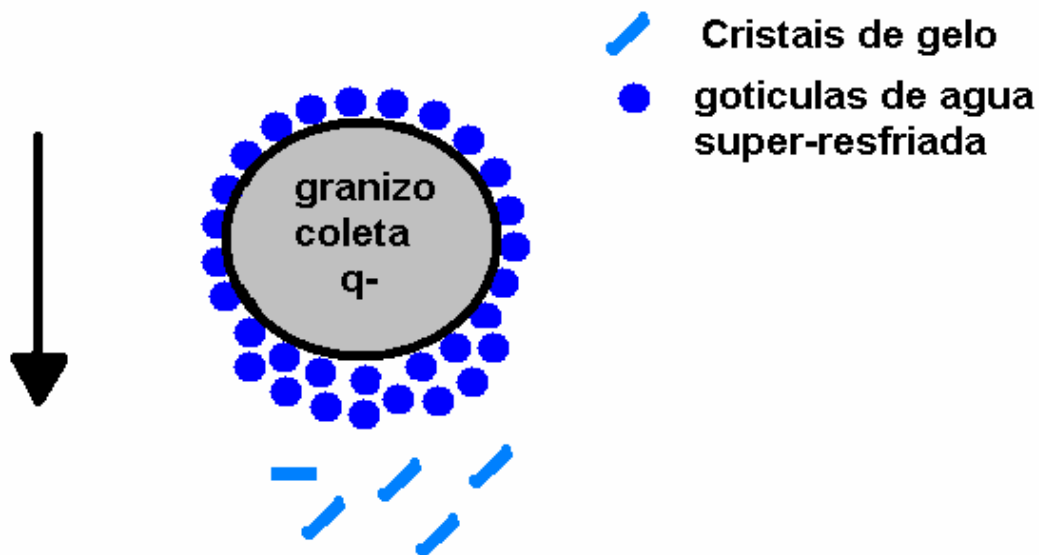


Figura ??: Granizo caindo em uma nuvem composta de gotículas de água super-resfriada e cristais de gelo.

Durante a colisão do granizo com os cristais de gelo, a superfície do granizo estará mais quente que a dos cristais de gelo porque ocorre liberação de calor latente de congelamento devido ao maior número de gotículas de água super-resfriada que colidem com o granizo.

Portanto durante o tempo que o cristal está em contato com a superfície do granizo, o granizo se tornará carregado negativamente e o cristal positivamente (H^+ migrarão para a parte mais fria). Logo quando os cristais de gelo rebatem do granizo, eles irão reter as cargas positivas e se a velocidade terminal for menor que a velocidade da corrente ascendente do ar na nuvem, eles serão transportados para a parte superior da nuvem. Por outro lado, os granizos se tornarão negativos e como têm velocidade terminal maior irão para a parte inferior da nuvem. Este processo pode levar a um carregamento da ordem de $1C/km^3min$.

b) Assumindo granizo precipitando sobre gotículas de água super-resfriada.

Quando gotículas de água super-resfriada se congelam, uma grande quantidade de lascas pequenas de gelo são lançada no ar. Considere ainda que a gotícula de água super-resfriada ao colidir com o granizo está em uma segunda fase de congelamento sobre a capa superficial do gelo e conseqüentemente está aumentando a espessura para dentro. A parte interna da superfície desta casca está em contato com a água líquida, logo $T \sim 0^\circ C$ e a externa está se resfriando com a temperatura ambiente, $T \leq 0^\circ C$. Conseqüentemente existe um gradiente de temperatura ao longo desta casca de gelo, o que pelo efeito termo-elétrico irá causar um aumento de q_+ na parte

externa da superfície. Uma vez que as lascas de gelo que se quebram das gotículas vem predominantemente da parte externa da casca de gelo, elas irão carregar as cargas positivas e deixar cargas negativas no granizo.

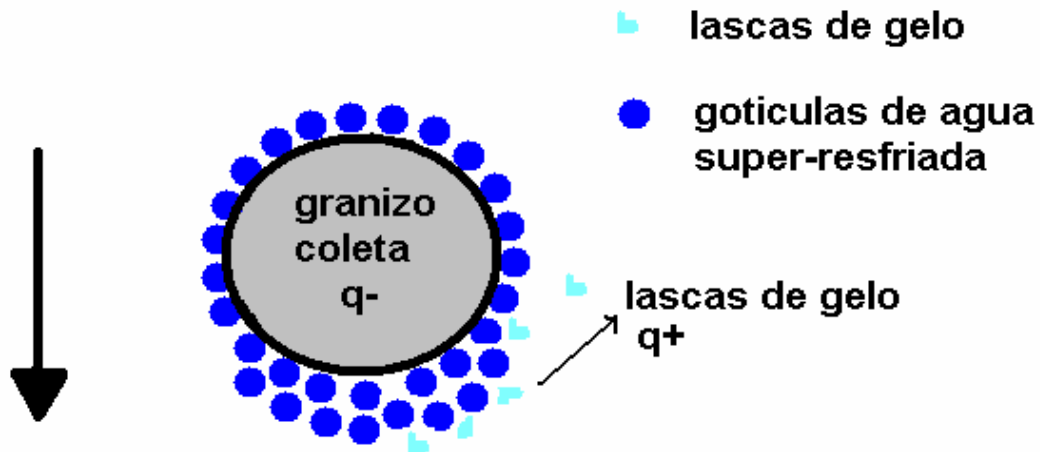


Figura ????. Granizo precipitando sobre gotículas de água super-resfriada que se congelam e produzem lascas de gelo.

4.2.2.5 Deslocamentos da estrutura do gelo:

Buracos ou deslocamentos em gelo com estruturas entrelaçadas ou cruzadas (lattice) criam redes de cargas associadas às moléculas, e estes deslocamentos podem mover-se através do gelo, e assim transportar cargas.

A concentração de deslocamento em gelos de congelamento (água super-resfriada que se congela espontaneamente por contato) aumenta com a diminuição da temperatura. A densidade de deslocamento é pequena para cristais de gelo com crescimento lento. Finalmente, deslocamentos de cargas positivas pode ser responsáveis pela transferência de cargas durante a colisão de graupel (rimed) e cristais de gelo.

4.2.2.6 Potencial de Contato:

Processo análogo ao potencial de contato entre 2 metais, ou seja, diferença de potencial e fluxo de corrente entre dois metais. Sendo que neste caso, diferentes formações de gelo podem criar diferentes potenciais. Por exemplo, cristais de gelo formados por congelamento e não congelamento. As observações indicam que a superfície do gelo congelado (rimed) tem potencial de contato negativo relativo ao não congelado. A magnitude do potencial de contato aumenta com a diminuição da temperatura para $\sim -200^{\circ}\text{C}$ e depois se mantém estável.

4.2.2.7 Camada Quase-Líquida

Além da dupla camada elétrica, alguns pesquisadores tais como Faraday (1860) e mais recentemente Baker e Dash (1994) sugeriram que a interface entre gelo e ar é realmente uma camada quase-líquida, mas com característica típica de gelo.

Analogia segue a seguinte fase de transição:

Vapor → Líquido → Gelo

Baker e Dash estudaram a troca de massa (molécula de água) entre partículas com diferentes espessuras na camada quase-líquida. Partículas com camadas superficiais mais expressas devem ter massa para as partículas com uma camada superficial mais fina, ou seja, o transporte pode ser visto como:

Temperatura	Talta → Tbaixa
Curvatura	Alta → Baixa

Esse raciocínio ainda gera controvérsias:

- A existência de uma camada quase-líquida;
- Espessura da camada líquida com a temperatura;

Exemplo:

Suponha que 2 partículas colidam, sendo que cada uma possui uma camada elétrica dupla, mas com espessuras diferentes, ou seja, camadas quase-líquidas diferentes;

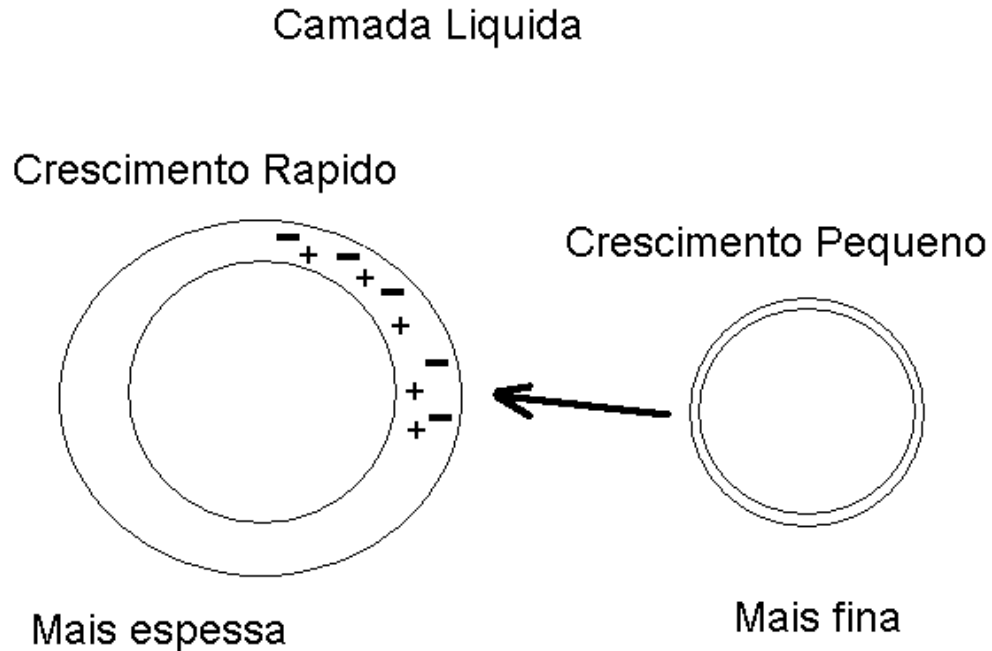


Figura 19. Esquema de transferência de cargas para o modelo de camada quase-líquida.

As diferentes espessuras da camada quase-líquida podem ter acontecido devido a forma de crescimento por deposição das partículas. Uma vez que ocorre colisão e separação, as partículas com camadas mais espessas perdem massa para as partículas que crescem devagar, deixando assim para as partículas que crescem mais rápido um excesso de cargas positivas (+).

4.3. Mecanismos de Eletrificação em Nuvens

Os mecanismos de carregamento podem variar entre 0 a 100×10^{-12} C de carga.

4.3.1 – Captura de Íons (Seletivo)

Os hidrometeoros que precipitam se tornam polarizados na presença de um Campo Elétrico, e ao caírem em relação aos íons que se movem sob a influência do vento e do Campo Elétrico, os íons de mesmo sinal, tais como na parte inferior dos hidrometeoros seriam repelidos, e os íons de sinal oposto seriam atraídos e capturados;

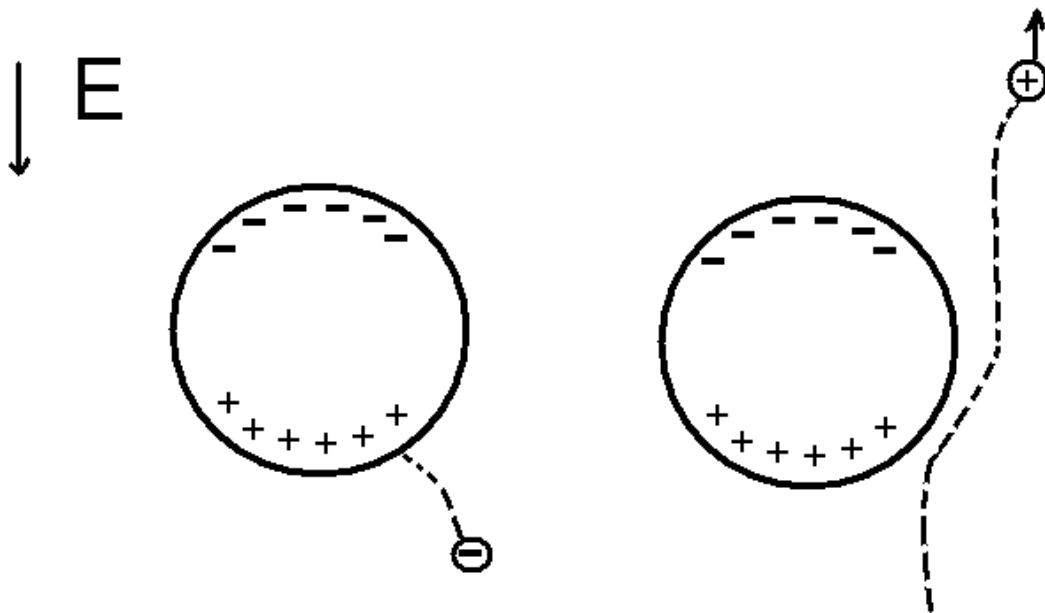


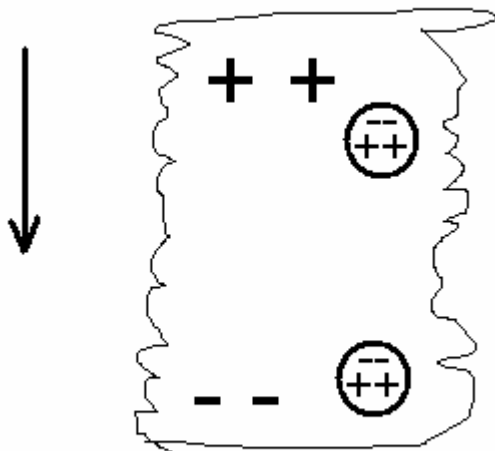
Figura 20. Transferência de cargas a partir da captura de íons em um processo seletivo.

Para este mecanismo funcionar, o movimento dos íons associados ao Campo Elétrico tem que ser menor que a velocidade dos hidrometeoros. Se a velocidade de deriva dos íons for maior que a Velocidade terminal da partícula precipitante, os íons de mesma polaridade do que a parte inferior do hidrometeoro podem ser capturados na parte superior do hidrometeoro. Dessa maneira ambas as polaridades podem ser capturadas.

A carga máxima que pode ser acumulada em um hidrometeoro é expressa por:

$$q_{\max} = 12\pi\epsilon \left| \vec{E} \right| r^2$$

onde ϵ é a permissividade elétrica da substância, e "r" é o raio da gota



Os hidrometeoros nas camadas de região negativa capturam íons (-), os quais tendem a aumentar a carga (-) nesta região de dipolo.

As partículas da região superior positiva devem capturar íons positivos (+), uma vez que eles são carregados para cima pelas correntes ascendentes e os íons (+) são deslocados para baixo devido a velocidade de deriva.

Em Tempestades, entretanto, a concentração de íons é insuficiente para uma captura “seletiva” de íons, a qual faça uma contribuição substancial para o desenvolvimento do Campo Elétrico.

Abaixo da base da nuvem a concentração de íons pode ser alta devido aos pontos de descarga.

Figura 21. Distribuição de cargas após o processo seletivo.

Se os processos seletivos de captura de íons são considerados a partir das condições iniciais como as encontradas em “bom tempo” (com densidade e campo elétrico de bom tempo), simulações numéricas sugerem que o campo elétrico pode crescer até ~ 10 kV/m, o que é muito pequeno quando comparado com medidas em tempestades (~ 100 kV/m). Este mecanismo é observado em nuvens eletrificadas fracamente, logo se conclui que não devem produzir relâmpagos.

4.3.2 Carregamento indutivo a partir de partículas que rebatem

Este mecanismo também é conhecido como mecanismo indutivo de partícula-partícula. Este processo baseia-se em um grau de polarização prévia devido a existência de um Campo Elétrico ambiente. O grau de polarização é diretamente proporcional à força aplicada pelo campo elétrico.

A transferência de carga entre 2 hidrometeoros carregados é bem complicado, pois a indução de cargas em cada hidrometeoro é modificado com a

aproximação de um outro hidrometeoro. Em princípio as partículas de chuva ao colidirem com as partículas de nuvens, transferem cargas da seguinte forma:

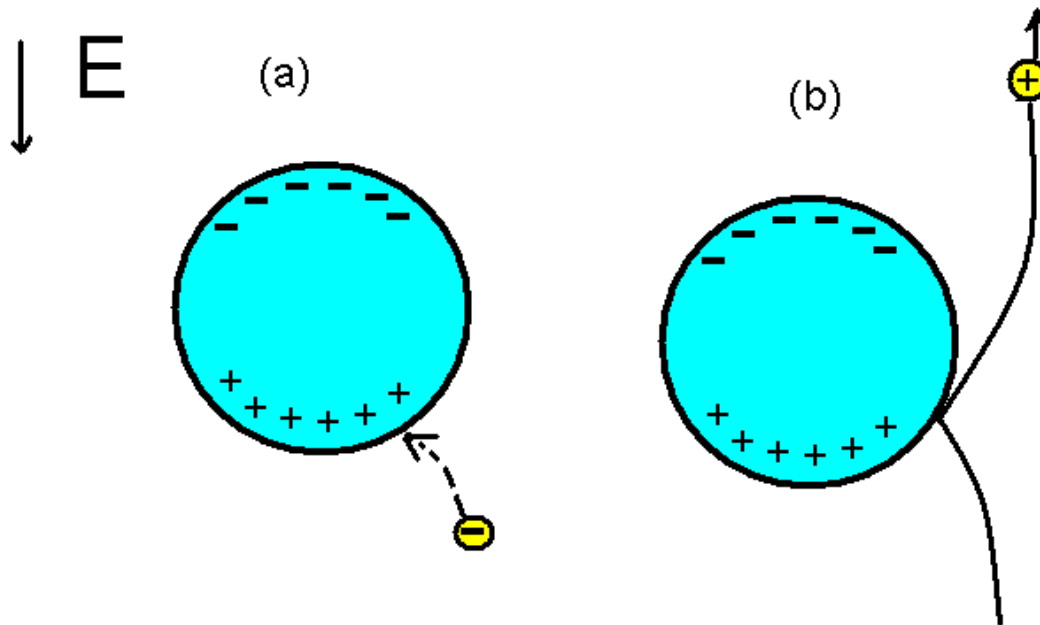


Figura 22. Transferência de cargas após a colisão entre partículas.

- (a) A partícula de nuvem (amarela negativa) recebe cargas positivas a partir da base da camada das partículas da chuva
- (b) A partícula que rebate carrega uma carga positiva resultante, ou o sinal da carga da base das partículas grandes;

Vários autores sugerem que o aumento de cargas nestas partículas pode ser descrito por:

$$dq = 4\pi\epsilon\gamma_1 \left| \vec{E} \right| R_{peq}^2 \cos \theta_{E,R} + A Q_{grande} - B Q_{pequeno}$$

$A Q_{grande} - B Q_{pequeno} \implies$ Termo Indutivo

$\left| \vec{E} \right| =$ Magnitude do Campo Elétrico Ambiente

$\theta_{E,R}$ = Ângulo formado entre o vetor do “E” e o ponto de impacto na superfície da partícula grande

Qpequeno → carga da partícula pequena (carga já existente)

Qgrande → carga da partícula grande antes do impacto

A, B e γ = parâmetros de escala.

$$A = \frac{\left(\frac{R_{peq}}{R_{grande}}\right)^2 \gamma_2}{1 + \left(\frac{R_{peq}}{R_{grande}}\right)^2 \gamma_2}; B = \frac{1}{1 + \left(\frac{R_{peq}}{R_{grande}}\right)^2 \gamma_2}$$

Rpeq/Rgde	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
γ_1	$\pi^2/2$	3.9	3.10	2.55	2.06	$\pi^2/6$
γ_2	$\pi^2/6$	1.36	1.21	1.11	1.04	1.0

γ em função de Rpeq/Rgde

Analisando a dependência angular

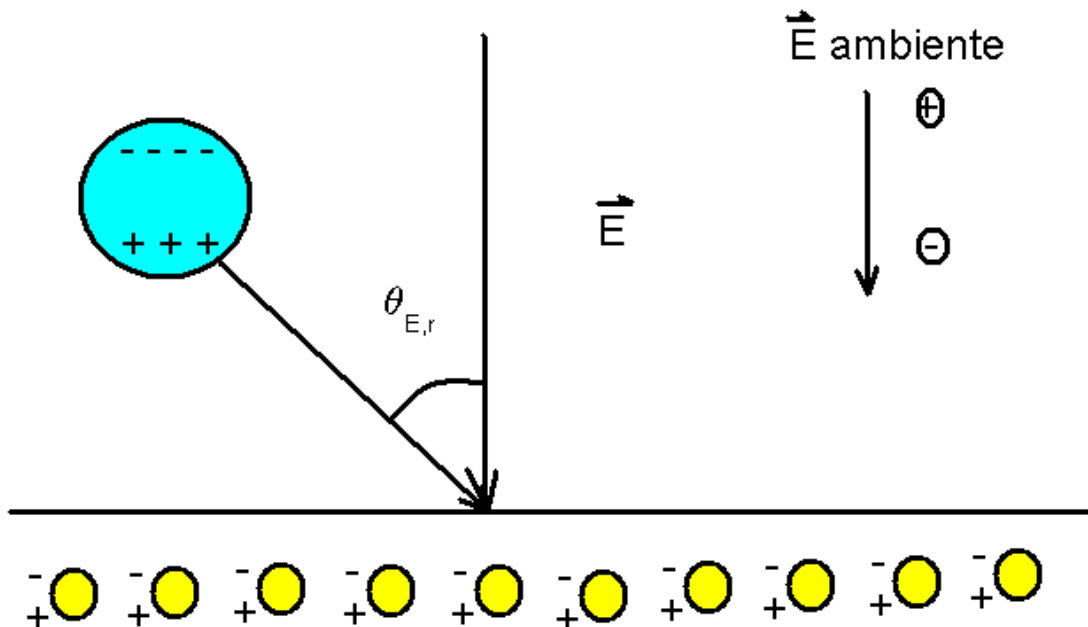


Figura 23. Ângulo formado entre a orientação do campo elétrico existente e a partícula precipitante.

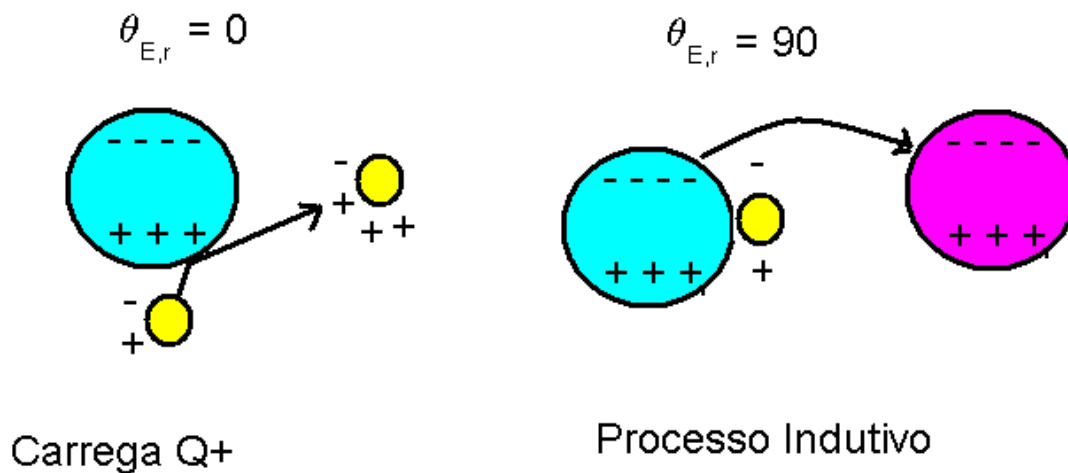


Figura 24. Transferência de cargas quando o ângulo formado entre a orientação do campo elétrico existente e a partícula precipitante é de 0 e 90°.

Neste mecanismo indutivo, existe uma dependência na separação das colisões. Se existe coalescência, não há um aumento no Campo Elétrico. Se o Campo Elétrico aumenta, a polaridade dos hidrometeoros cresce, o que provoca uma separação de cargas mais favorável.

Como a coalescência varia em funções de $\theta_{E,R}$? *Coalescência cresce com o ângulo.* Então isso pode afetar o aumento de dQ ? Se $\theta_{E,R}$ diminui, existe uma baixa probabilidade de coalescência e um alta separação. Se $\theta_{E,R}$ aumenta, existe uma alta probabilidade de coalescência e baixa separação, ou seja, a probabilidade de separação de partículas decresce.

Condições para que o mecanismo indutivo seja eficiente:

- Partículas que colidem devem se separar;
- Tempo de contato entre as partículas que colidem dever ser longo o suficiente para que as cargas se transfiram de uma superfície a outra;

O Fluxo de cargas é governado pela condutividade da superfície das partículas que colidem. A condutividade da água é maior que a do gelo;

- 2 gotas → Tempo de contato suficiente para que a condutividade da superfície mova a carga;

- b) Gota e Partículas de gelo → separação a partir da colisão;
- c) 2 Partículas de gelo → A condutividade do gelo é muito pequeno para que o transporte seja eficiente durante o tempo de contato;
- d) O Graupel cresce ativamente a partir da aglutinação;

O Debate atual, é que a transferência de cargas entre o graupel e as partículas de gelo que não se aglutinam. Saunders afirma que neste processo existe suficiente transferência de cargas.

4.3.3 Aumento do número de Cargas

De forma a aumentar o número de cargas em 2 regiões vizinhas de polaridade opostas, as colisões devem transferir cargas positivas para as partículas que se movem para cima e negativa para as que se movem para baixo (assumindo um modelo de dipolo)

As incertezas ocorrem por causa do nosso pouco conhecimento da natureza das colisões entre as partículas, exemplo:

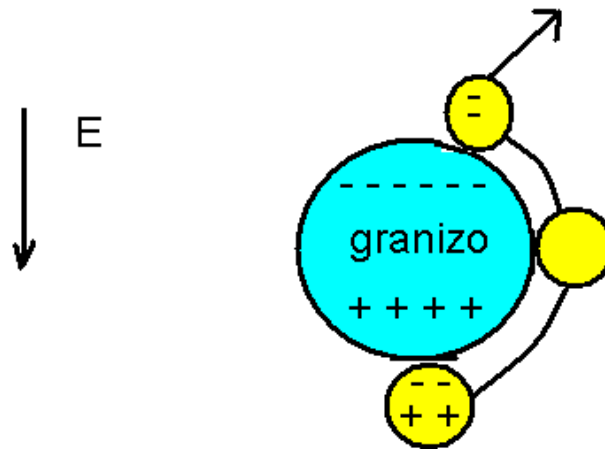


Figura 25. Transferência de cargas entre partículas de granizo.

A gota circula ao longo do granizo antes de haver uma separação. Ela pode sair sem uma carga negativa resultante, o que implicaria que o Campo Elétrico ficaria fraco.

Os processos indutivos são somente considerados importantes para precipitações congeladas e gotas super-resfriadas. Nesta situação existe um Campo Elétrico significativo para que haja uma polarização.

Aufderman e Johnson (1972) sugeriram que as colisões entre graupel e gotas (~ 1-10 rebatem a partir de ~ 1000 colisões) em Campo Elétrico ≥ 10 kV/m poderia ser importante para manter as tempestades eletrificadas

Finalmente, o mecanismo indutivo deve agir para sustentar Campos Elétricos Altos, mas eles não agem para criá-los.

4.3.4. Mecanismo não indutivo

Qualquer mecanismo que não requer uma polarização sob a ação de um Campo Elétrico pode ser considerado um mecanismo não indutivo.

Antigamente assumia-se que neste mecanismo incluíam-se:

- Geração de cargas entre graupel e gotas;
- Geração de cargas entre graupel e cristais de gelo;
- Geração de cargas entre graupel e cristais de gelo na presença de gotas super-resfriadas;

Estudos em laboratório realizados por Reynolds et al. (1957) focaram suas análises para os mecanismos de graupel e gelo.

4.3.4.1 Descrição empírica do mecanismo de graupel e gelo:

Medidas em laboratório mostraram que existe uma dependência com: polaridade das gotículas, LWC, tamanho e polaridade dos cristais de gelo, velocidade de impacto e temperatura;

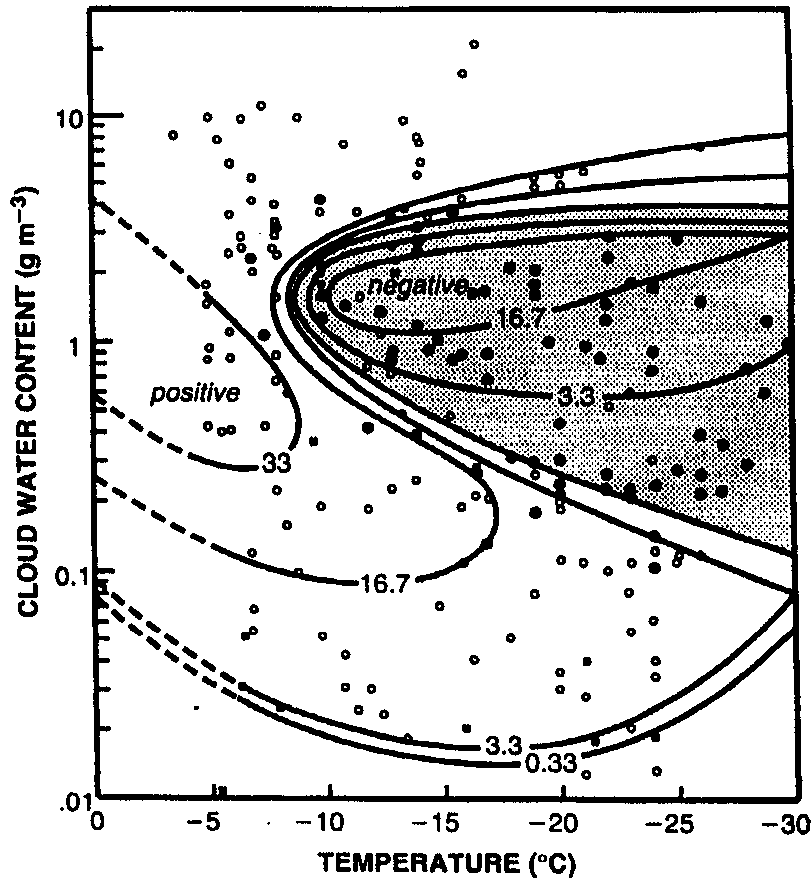


Fig. 3.12. Charge (in fC) gained by rimed graupel colliding with ice particles as a function of temperature and liquid water content. Open circles indicate that rimed graupel gained positive charge, solid circles indicate that it gained negative charge, and x's indicate that no charge was transferred. (Adapted from Takahashi 1978, with permission.)

Figura 26. Distribuição do carregamento de partículas de graupel (saraiva) em função da temperatura e do conteúdo de água líquida, após Takahasi 1978.

Takahashi (1978) encontrou que a magnitude e o sinal da carga depositada nos graupels depende da temperatura e do LWC. O tamanho da gota líquida não tem efeito nenhum quando o LWC é constante.

Fig. 3.13. Charge per event versus crystal size. Solid circles are data points from Jayaratne et al. (1983); triangles, squares, and open circles are data points from Keith and Saunders (1990). Squares denote particles composed of bullet clusters (i.e., clusters of bullet-shaped ice crystals). (a) Positive charge per event; (b) negative charge per event. (From Keith and Saunders 1990, with permission.)

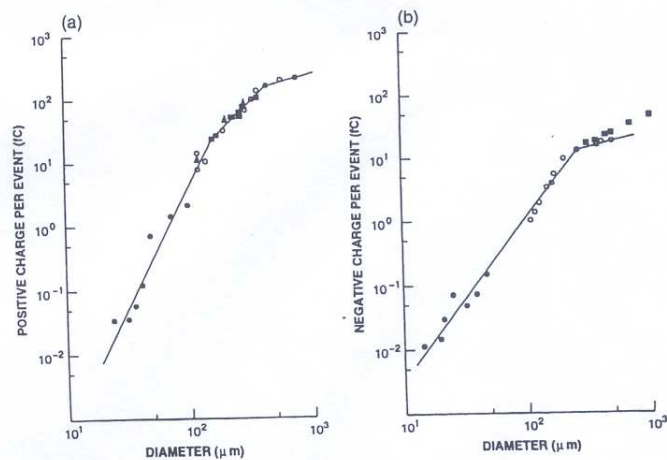


Figura 27. Carregamento das partículas em função do diâmetro da partícula de acordo com Keith e Saunders, 1990.

Jayaratne et al. 1983 e Keith e Saunders, 1990, mostraram que o carregamento depende adicionalmente do tamanho dos cristais de gelo que colidem com o graupel, da velocidade de impacto e das partículas contaminantes presentes nas gotas de água (CCN). Note que o aumento na transferência de cargas por colisão diminui com o crescimento do cristal de gelo.

4.3.5. Eletrificação por correntes externas

Associado ao mecanismo de convecção

- a) Um pequeno cumulus começa a se desenvolver e cargas positivas de espaço são ingeridas e forma-se uma camada de blindagem negativa nas fronteiras da nuvem

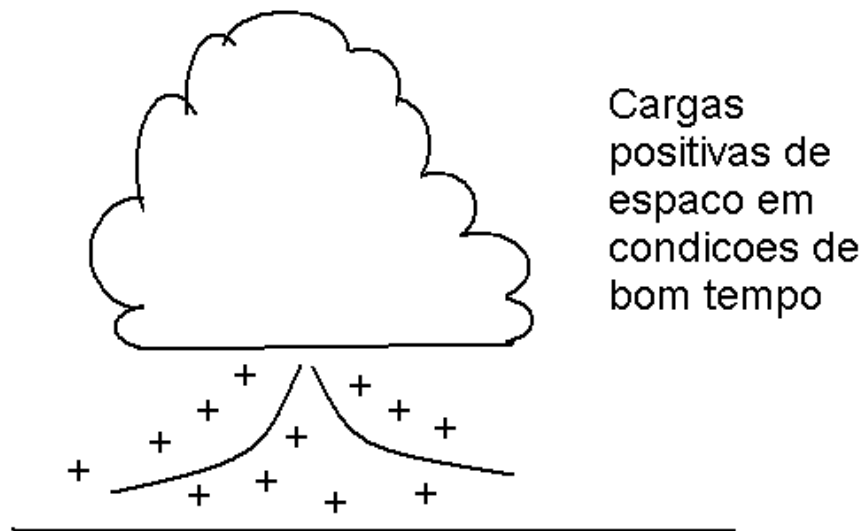


Figura 28. Desenvolvimento de uma camada de blindagem durante a formação de uma nuvem cumulus.

- b) O transporte organizado de cargas negativas ocorre quando as partículas de nuvem das bordas se movem para baixo da base da nuvem.

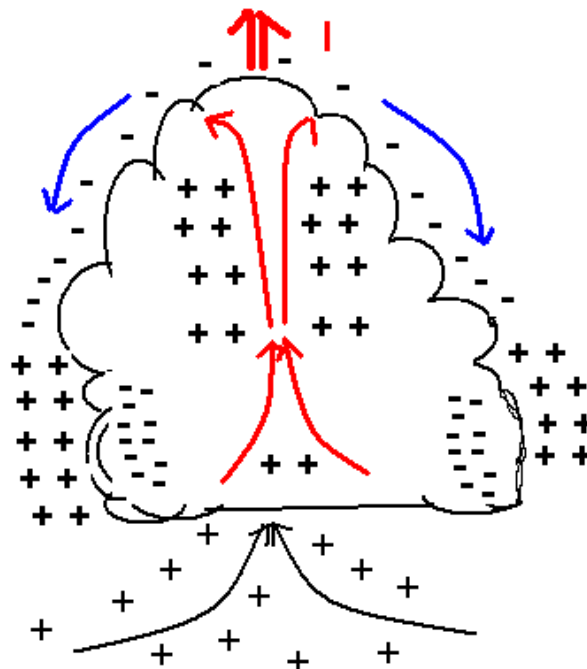


Figura 29. Transferência e distribuição de cargas em uma nuvem cumulus com desenvolvimento vertical.

O fluxo de cargas positivas continua na corrente ascendente e a corrente continua a transportar para o topo da nuvem para se ajustar com as cargas positivas novas e a perda de cargas nas camadas do topo da nuvem devido ao transporte lateral para baixo.

- c) O Campo Elétrico das cargas negativas na parte baixa da nuvem se torna forte o suficiente para produzir um efeito de corona na superfície da terra. O que conseqüentemente aumenta o fluxo de cargas positivas na base da nuvem. Observa-se muitas cargas positivas de espaço devido a corona.

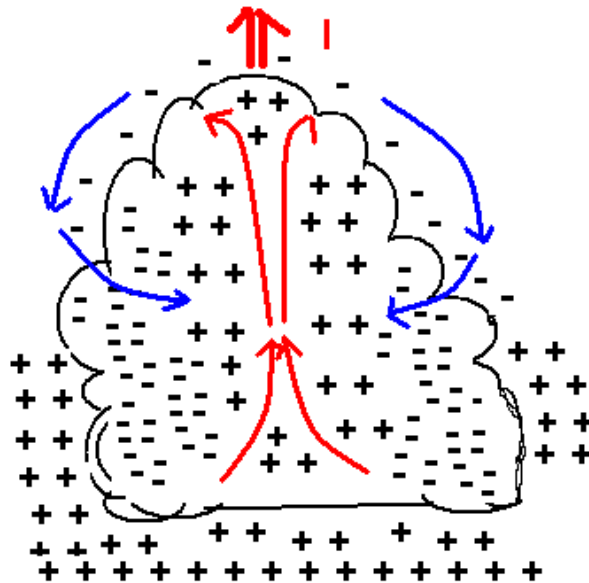


Figura 30. Distribuição final de cargas em uma nuvem cumulus.

4.3.6. Carregamento durante o derretimento

- Dinger e Gunn (1946) e Magono e Kiknch (1965)
- Ainda existe muita contravérsia;
- Em princípio o gelo se carrega positivamente quando se derrete. O Carregamento ocorre quando bolhas de CO₂ se libertam do gelo e se quebram sob a superfície molhada do gelo. Esta camada de bolha que se quebra, carrega as Q⁻, o que implica que as partículas de gelo tem um excesso de Q⁺.