

## MODIFICAÇÃO ARTIFICIAL DE NUVENS CUMULUS QUENTES NA REGIÃO SEMI-ÁRIDA DO NORDESTE BRASILEIRO

Por *Ulysses Belculfiné*<sup>1</sup>

### 1 - INTRODUÇÃO

É por todos sabido, a importância que a água representa para a humanidade, em termos sociais e econômicos; não é por acidente que os países mais desenvolvidos do mundo se localizam em regiões onde existe abundância de água. Ademais é do conhecimento geral, que a quase totalidade da água de consumo do mundo, advém da atmosfera.

Por outro lado, é também fato notório, a existência de uma vasta região no nordeste brasileiro, com grandes irregularidades na distribuição da pluviosidade, por vezes até ausência total, embora isto venha a se constituir numa anomalia da natureza já que essa região se localiza numa faixa de latitudes onde a precipitação abundante é uma tônica ao redor de todo o globo terrestre. Embora muito já se tenha escrito a respeito, as razões para a sua ocorrência ainda não estão devidamente esclarecidas. O fato acima mencionado preocupa sobremaneira as autoridades, uma vez que essa carência ou irregular distribuição das chuvas atingem duramente a população

---

(1) - Divisão de Ciências Atmosféricas, Instituto de Atividades Espaciais, Centro Técnico Aeroespacial

regional criando problemas, na maioria das vezes, insolúveis.

Entre outras tecnologias, Modificação Artificial de Tempo pode ser usada, não para evitar as causas mas como um auxílio na tentativa de mitigar os efeitos causados pelo distúrbio atmosférico.

Há pouco mais de três décadas era quase que completamente desconhecido o fato de que as condições de tempo poderiam ser modificadas artificialmente, sendo mesmo considerado humanamente impossível fazê-lo, dada a enorme quantidade de energia envolvida. No entretanto, com o surgimento de uma teoria devida a Findeisen, esta belecendo que as gotas de chuva, em nuvens quentes, creciam principalmente através de um mecanismo de colisão-coalescência, e outra devida a Bergeron, que atribuía as chuvas oriundas de nuvens frias à coexistência de cristais de gelo e gotas super-resfriadas, o caminho foi aberto para uma possível alteração, pelo homem, das condições, por vezes extremas, impostas pela natureza. Essas descobertas motivaram imediatamente pesquisas sucessivas e mal a picada foi aberta, foi iniciada a pavimentação daquela que seria a estrada que levaria o homem ao domínio das intempéries provocadas pela natureza, no que tange à atmosfera terrestre.

Desde sua conscientização, o homem passou então a dedicar grande parte do seu tempo e recursos em pesquisas sobre a Microfísica e Dinâmica das nuvens, a ponto

de já permitir, hoje, o planejamento de programas operacionais nesse campo de atividades, com finalidades as mais diversas, como, aumentar ou diminuir, provocar ou inibir chuvas, oriundas de nuvens do tipo convectivo. Os estudos que se vêm realizando no campo da Física de Nuvens e Modificação Artificial de Tempo, em todo o mundo, durante os últimos anos adquiriram tamanho vulto, que fatalmente levarão a humanidade a dominar os maiores impulsos da natureza no que concerne à sua atmosfera, no sentido de corrigir suas aberrações, como nos casos dos furacões e tufões que assolam os oceanos Atlântico Norte, Pacífico e Índico, causadores de tanta destruição e mortes, dos tornados muito comuns nos EE.UU. e Europa de consequências altamente desastrosas, das enchentes e secas que ocorrem ao redor de todo o mundo em diversas épocas do ano, responsáveis por reduções e perdas de safras agrícolas, das granizadas que quando de sua ocorrência em latitudes médias, destroem alguns tipos de culturas como, frutas temperadas e fumo, dos nevoeiros sobre aeroportos que tantos prejuízos trazem às companhias aéreas e a seus usuários, das descargas elétricas oriundas de nuvens cumulonimbus que provocam incêndios em florestas de grande extensão; para citar apenas alguns exemplos.

O nordeste brasileiro, apresenta uma potencialidade muito alta no que se refere à provocação de chuvas por meios artificiais, já que a incidência de nuvens

convectivas, aquelas que aceitam a aplicação da tecnologia, é predominantemente maior que as estratificadas, o que é uma característica de regiões tropicais. O fato dessa nossa região necessitar de uma maior regularidade na distribuição de chuvas e de apresentar um alto potencial para modificação das nuvens por processos artificiais, levou a SUDENE, organismo responsável pelo desenvolvimento da região e o Ministério da Aeronáutica, através do Centro Técnico Aeroespacial, possuidor de um grupo capaz de aplicar a nova tecnologia, a firmarem um convênio com a finalidade de pesquisar as viabilidades técnica e econômica de modificar artificialmente a pluviosidade na região semi-árida do nordeste brasileiro, com o objetivo não só de aumentar a quantidade de água precipitável como também melhor distribuir as chuvas dentro do período chuvoso e ainda prolongar esse mesmo período.

## 2 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS

As nuvens cumulus, que se formam no interior nordestino são, na maioria dos casos, oriundas de um aquecimento desigual do solo que ocasiona células isoladas de convecção. A parcela aquecida, mais leve que o seu entorno, ascende e, nessa subida, devido à diminuição da pressão com a altura, se expande quase adiabaticamente fazendo com que sua temperatura interior caia, à razão de  $1^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ , a princípio e  $0,5^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ , posteriormente.

Com a queda de temperatura no interior da parcela, sua capacidade para conter a umidade em forma de vapor, que possuía nos níveis inferiores, vai diminuindo à medida que vai subindo, até atingir um nível de saturação chamado Nível de Condensação por Levantamento. A partir daí, inicia-se o processo de condensação do vapor sobre núcleos naturais, originariamente existentes na atmosfera, formando pequenas gotículas, a princípio em número muito elevado e tamanho uniforme (raio  $< 10\mu$ , quando se tornam visíveis a olho nu). A partir do momento que se inicia o processo de condensação, a parcela torna-se mais aquecida que o seu entorno, devido a liberação de calor latente ocasionada por essa mudança de fase e, com isso mais leve, tornando deste modo natural a sua subsequente ascensão. Desta maneira forma-se uma corrente ascendente que desloca as gotículas para cima, até um nível onde, as parcelas inicialmente formadas tornem-se mais pesadas que a região circunvizinha, nível onde a nuvem terá seu topo.

Até aqui apenas falamos no crescimento das gotículas por difusão de vapor. Se entre as gotículas originalmente formadas não existirem umas poucas gotas maiores geralmente formadas sobre núcleos higroscópicos, naturalmente existentes na atmosfera livre, essa nuvem assim formada, crescerá, atingindo seu estágio maduro e se dissipará sem provocar chuvas porque apenas a difusão de vapor não será suficiente, como o tempo de vida

que a nuvem dispõe, para fazer com que as gotas atinjam o tamanho de precipitação. No entanto, se entre as minúsculas gotículas inicialmente formadas, existirem umas poucas maiores (2 ou 3 gotas/litro de nuvem), estas acionarão um novo mecanismo, de colisão-coalescência, responsável pelo desencadeamento de chuvas em cumulus quentes.

As gotículas maiores e menores formadas, por difusão de vapor, no estágio inicial da nuvem, são levadas para níveis mais altos no seu interior pelas correntes ascendentes. Nessa ascensão elas vão se colidindo devido às suas diferenças de massa que ocasionam velocidades desiguais. As gotas menores subindo com velocidade maior vão encontrando nas suas trajetórias as gotas maiores, mais lentas devido à sua maior inércia e com elas vão se colidindo. As experiências de laboratório em câmaras artificiais de nuvens mostram que todas as gotas que colidem se aglomeram para resultarem em outras maiores. Essas gotas crescerão e crescerão até que as correntes verticais ascendentes não sejam mais suficientes para suportá-las, caindo então por gravidade e surgindo na base da nuvem em forma de chuva. Se as gotas, ainda no interior da nuvem atingirem um diâmetro  $\geq 3\text{mm}$ , se rompem dando formação a gotas menores que regeneram o processo, constituindo-se num mecanismo multiplicativo das gotas grandes que iniciam o mecanismo de colisão e coalescência. Por outro lado, as gotas que saem pela ba

se da nuvem em forma de chuva, terão que ter um tamanho mínimo para suportar a evaporação até atingir o solo. Em latitudes tropicais, para uma umidade relativa média de 70%, entre a base da nuvem e a superfície da terra, a gota deverá emergir com um raio  $\geq 0,75\text{mm}$ , porque do contrário não sobreviverá à evaporação.

### 3 - MODIFICAÇÃO ARTIFICIAL DE TEMPO

A condição essencial para proporcionar a tentativa de modificar o tempo artificialmente, é a existência de umidade em quantidade suficiente e conseqüentemente nuvens. A ausência de nuvens impede qualquer tentativas nesse sentido, pelo menos com os métodos existentes e em uso, operacionalmente, na atualidade. A região em apreço, apresenta condições iniciais, em grande parte do ano o que nos encoraja a partir para um programa de pesquisas visando regularizar a pluviosidade, em bases científicas, nos moldes de experimentos já realizados com êxito, em outras regiões do mundo.

Tentativas modernas na área de modificação artificial da microfísica das nuvens, são baseadas em quatro(4) suposições principais:

1. a presença de cristais de gelo numa nuvem super-resfriada (topo acima da isoterma de  $0^{\circ}\text{C}$ ) é necessária para liberar chuva pelo processo de Bergeron e a presença de gotículas comparativamente maiores numa nuvem quente (topo abaixo da isoterma de  $0^{\circ}\text{C}$ ), é

- essencial para iniciar o processo de coalescência , responsável pela precipitação neste tipo de nuvens;
2. algumas nuvens precipitam ineficientemente ou mesmo não precipitam, porque esses agentes são naturalmente deficientes;
  3. essa deficiência pode ser superada, nucleando a nuvem artificialmente com iodeto de prata, quando frias ou introduzindo núcleos higroscópicos, quando quentes;
  4. a supernucleação em doses maciças, resultará em grandes concentrações que incapacitarão as gotículas de crescerem suficientemente, podendo mesmo retardar ou evitar o desenvolvimento das chuvas.

Algumas nuvens do tipo cumulus quente, às vezes, precipitam ineficientemente ou mesmo nem precipitam por deficiência de gotículas comparativamente maiores, capazes de iniciar o mecanismo de colisão e coalescência. No entanto, essa deficiência pode ser superada pela injeção, no interior das nuvens, de núcleos higroscópicos gigantes sob a forma de gotículas de solução de cloreto de sódio ou de um composto de uréia com nitrato de amônio, em proporções adequadas.

A gotícula de solução higroscópica, quando introduzida na nuvem cumulus, apresentando uma pressão de vapor inferior à da água líquida, provocará uma difusão de vapor das gotículas de água pura na sua direção, pro

vocando um crescimento mais rápido do que as demais, ultrapassando o valor crítico de raio  $\geq 18\mu$ , abaixo do qual é praticamente impossível a ocorrência natural da colisão. A partir desse instante, à medida que todas as gotículas, grandes e pequenas, ascendem na corrente ascendente da nuvem, as colisões e consequentes coalescências começarão a ser mais e mais frequentes já que as gotas maiores, subindo com velocidades menores, favorecerão o choque com as menores. As gotas já aglomeradas, continuarão subindo e crescendo após cada colisão até um nível em que a corrente não mais conseguirá equilibrá-la quando então iniciarão uma trajetória de queda continuando o processo de choque e captura das gotas que encontrar no seu percurso até saírem pela base da nuvem em forma de precipitação.

#### 4 - TECNOLOGIA APLICADA AO NORDESTE BRASILEIRO

Dada a elevada incidência de nuvens do tipo cumulus quente no Nordeste semi-árido e seu aspecto aparente passível de aceitar modificação artificial, foi aberto um projeto oriundo de um convênio entre a SUDENE e o Ministério da Aeronáutica, tendo o Centro Técnico Aeroespacial de São José dos Campos - SP como órgão executor, para pesquisar as viabilidades técnica e econômica da aplicação dessa moderna tecnologia na região. Esse projeto foi dividido em 4 grandes etapas:

1. aquisição, revitalização e instrumentação de uma ae-

- ronave laboratório e preparação de pessoal;
2. coleta de dados de parâmetros de nuvens pela aeronave laboratório, processamento e análise dos mesmos;
  3. nucleação de nuvens cumulus quentes em área piloto, com soluções higroscópicas;
  4. Avaliação estatística.

Após o cumprimento da primeira etapa, custosa e demorada, já que todo o equipamento de medidas é produto de importação e o C.T.A. carecia de uma equipe capaz de levar a cabo um projeto dessa envergadura tendo que preparar pessoal no exterior, foi realizada a segunda etapa uma vez que antes de iniciar qualquer trabalho de nucleação ter-se-ia que conhecer o material, no caso, as nuvens do nordeste, onde a tecnologia deveria ser aplicada. Durante um ano inteiro foram tomadas cerca de quatro milhões de medidas de parâmetros de nuvens como temperatura, pressão, ponto de orvalho, umidade relativa, conteúdo de água líquida, quantidade de núcleos de condensação, razão de precipitação e tamanhos de gotas de chuva. Esses dados foram coletados em 3 níveis, base, meio e topo de 267 nuvens, num total de 476 horas de vôo, em toda a região semi-árida do nordeste brasileiro. A razão dessas medidas era para se determinar a potencialidade das nuvens da região da aceitação ou não da tecnologia de modificação artificial.

A análise posterior dos dados concluiu, como já era esperado, pela viabilidade, traduzida nos seguintes re -

sultados mais relevantes:

1. das nuvens existentes no Nordeste semi-árido, 83% são do tipo cumulus quente, dos quais um terço apresenta dimensões suficientes para aceitar nucleação artificial;
2. o conteúdo de água líquida médio das nuvens da região é de  $0,35 \text{ g/m}^3$ , valor um pouco superior àquele encontrado por J. Warner na Austrália, onde tem-se desenvolvido, com êxito, programas operacionais de aumento de pluviosidade;
3. valores de conteúdo de água líquida superiores a  $1 \text{ g/m}^3$ , foram encontrados a 200 m abaixo do topo das nuvens, o que mostra a alta capacidade das nuvens daquela região de processar água líquida;
4. umidades relativas médias entre 60 e 70% entre a base e o solo, valor considerado não elevado para regiões semi-áridas, no que concerne à evaporação das gotas de chuva após emergirem da base das nuvens, tendo grandes chances de atingir o solo;
5. Predominância de ventos na região de Petrolina - PE, área escolhida como piloto para os experimentos de campo o que favorece a não contaminação da área de controle quando da nucleação na área alvo
6. descoberta empírica do coeficiente de mistura lateral das nuvens da região, de 0,7, para ser usado no modelo numérico de cumulus que seria utilizado mais tarde na etapa de nucleação.

Além dessas conclusões outras menos relevantes também foram determinadas.

Paralelamente, nesta etapa foi desenvolvido um modelo matemático para ser utilizado durante as nucleações quando das operações de campo. O modelo original foi desenvolvido na Pennsylvania State University (1968) e adaptado para as nossas regiões. Os principais objetivos do modelo são:

- a. simular o comportamento da nuvem quando agentes nucleantes são processados na mesma;
- b. um método para reconhecer se as condições atmosféricas são propícias para o aumento da precipitação.

O atual estágio de modelos de simulação de nuvens cumulus é tal que aqueles de duas dimensões, "time-dependent" requerem demasiado tempo de computador para serem utilizados como guias em operações de nucleação. Embora menos reais fisicamente, modelos de uma dimensão, "steady-state", utilizam muito pouco tempo de memória de computador, tornando-os economicamente adequados para o uso operacional no campo.

Devido à falta de maior conhecimento sobre o conjunto completo das equações que governam um processo físico particular, os modelos numéricos simplificam os processos físicos complexos por meio de parametrizações. No nosso modelo em particular utilizamos a autoconversão de Berry, o processo de coalescência na distribuição de Marshall-Palmer e velocidade terminal de

Gunn ajustada por Kessler. Esse modelo está sendo aplicado no momento para as nucleações da região de Petrolina-PE com resultados animadores.

#### 5 - NUCLEAÇÃO DE CUMULUS QUENTES NO NORDESTE

Esta etapa, iniciada em janeiro de 1977, está no seu terceiro ano de realização. Durante este período, a aeronave laboratório voou 712 horas em trabalhos de nucleação, utilizando 126.000 litros de solução saturada, ora de cloreto de sódio, ora de um composto de uréia com nitrato de amônio. Este último está sendo abandonado devido às dificuldades de entupimento dos atomizadores, que sistematicamente apresenta.

As operações de nucleação são realizadas sobre a região de Petrolina-PE e Juazeiro-BA, onde, em duas áreas de 20 x 20 km, separadas por 30 km uma da outra, foram instalados 32 telepluviômetros que têm a capacidade de coletar a chuva caída, armazenar e transmitir os dados automaticamente para uma estação central que além de apresentá-los numa impressora, grava-os em fita magnética, de modo que os dados, ao final de um dia de operação, estão prontos para o processamento. Enquanto uma dessas áreas é usada como alvo, a outra é como controle, sem fixar nenhuma delas como alvo ou como controle.

Durante os 3 anos de trabalhos de nucleação na área piloto, as nuvens da região foram observadas du -

rante 435 dias (somente na estação úmida) dos quais 168 foram considerados dias nucleáveis, o que representa uma porcentagem bastante elevada. Se considerarmos que o período a ser observado abrange 700 dias e que só foram observados 435, podemos concluir que mais de um quinto destes três anos de operação apresentou nuvens em condições de nucleação.

Em virtude do MODART só possuir uma aeronave, um DC-3, que realiza uma revisão em Recife-PE a cada 50 horas de voo, ademais de apresentar outros problemas inerentes à sua operação, dos 210 dias nucleáveis, somente 142 foram aproveitados; nos outros 68 dias a aeronave encontrava-se ausente de Petrolina, por diferentes razões, todas plenamente justificáveis. Durante esses 142 dias operacionais, foram nucleados 970 cumulus, dos quais em 892 observou-se visualmente, a queda de chuva. Os demais 78, dissiparam sem precipitar, o que está sendo objeto de estudos.

Naturalmente ainda é muito cedo para se tirar alguma conclusão de que os resultados serão ou não satisfatórios para aquela região, mesmo porque os dados pluviométricos ainda não começaram a ser analisados. No entanto, algumas observações dignas de nota por mostrarem que o método apresenta resultados satisfatórios:

1. Os cumulus após nucleados, na sua quase totalidade, crescem mais do que aqueles não nucleados, localizados nas adjacências;

2. Os cumulus nucleados, na sua maioria, precipitam enquanto que os outros ao redor não o fazem;
3. Durante o mês de fevereiro ocorreram 16 dias nucleáveis dos quais somente 5 dias foram nucleados, por ausência da aeronave na região de Petrolina. Coincidentemente ou não, somente ocorreram chuvas, na região, naqueles 5 dias, enquanto que nos outros 11 não houve precipitação natural.

Embora as observações anteriores sejam desprovidas de caracteres cientificamente conclusivos, elas servem como um indicativo de que o processo aplicado tem grande possibilidade de êxito, o que poderá ser comprovado através da avaliação estatística que será realizada após 5 anos de experiências.

## 6 - AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA DO PROJETO

Nesta etapa foram estudados vários modelos de avaliação estatística para a escolha daquele que melhor se aplicasse aos nossos trabalhos. Após minuciosos estudos optou-se pelo modelo "CROSS-OVER" por proporcionar um total aproveitamento dos dias nucleáveis, o que tornará a avaliação estatística mais confiável, já que o número de casos será bem maior. O modelo escolhido já foi simulado para a região apresentando bons resultados.

A seleção do modelo "Cross-over" foi precedida de um estudo do campo de ventos entre a superfície e 600mb

para que se verificasse o risco de contaminação existente entre a área alvo e de controle. Comprovou-se não haver quase nenhum risco de contaminação, definindo assim a seleção do modelo.

Para avaliação dos resultados de nucleação serão aplicados testes estatísticos não paramétricos.

## 7 - CONCLUSÃO

Naturalmente ainda é um pouco cedo para se afirmar com segurança que a tecnologia é aplicável para a região, mesmo porque as análises dos dados pluviométricos ainda não estão concluídas. No entretanto, resultados preliminares dessa análise e algumas observações dignas de nota levam a crer que obteremos ao final do projeto resultados satisfatórios.

Seguem algumas conclusões antecipadas:

1. Os cumulus após nucleados, na sua quase totalidade, crescem mais do que aqueles não nucleados das adjacências;
2. Os cumulus nucleados, na sua grande maioria, precipitam enquanto que os outros ao redor não o fazem;
3. Durante o mês de fevereiro de 1977, ocorreram 16 dias nucleáveis dos quais apenas 5 foram nucleados, por ausência da aeronave em Petrolina. Coincidentemente ou não, somente ocorreram chuvas naqueles 5 dias;
4. O aumento médio conseguido nestes 3 anos de nucleação é da ordem de 26%;

5. Observou-se a ocorrência de chuvas entre as grandes chuvas naturais o que raramente acontecia antes;
6. Tem-se conseguido algumas chuvas em novembro e junho, início e fim do período chuvoso da região.

Embora a maioria das conclusões anteriores seja desprovida de caráter científico, elas servem como um indicativo de que o processo aplicado tem grande possibilidade de êxito o que só poderá ser comprovado após a conclusão da avaliação estatística ao final dos 5 anos de trabalhos de campo.

Posso garantir-lhes que os resultados são realmente alentadores.