

# III CONFERENCIA TÉCNICA SOBRE HURACANES Y METEOROLOGÍA TROPICAL TECHNICAL CONFERENCE ON HURRICANES AND TROPICAL METEOROLOGY

México, D. F., Jun. 6-12, 1963

8a. SESIÓN

8th. SESSION

PRECIPITACIÓN Y MODIFICACIÓN DEL TIEMPO  
PRECIPITATION AND WEATHER MODIFICATION

## PARAMETROS MICROFISICOS EN RELACION CON LA DISTRIBUCION Y PRECIPITACION DE NUBES TROPICALES Y SU MODIFICACION

EDWIN KESSLER, III \*\*

### RESUMEN

Se han considerado los parámetros microfísicos y el perfil de viento vertical respecto a formas de distribuciones espacial y temporal de la precipitación tropical. Para un campo de velocidad vertical particular, se ha concentrado la precipitación bajo un centro de corriente ascendente respecto a la alejada del centro por números relativos de pequeñas gotas en incremento en la distribución de partículas de lluvias. El aumento de eficiencia en recolección de lluvia por nube y un más rápido índice de crecimiento de partículas de nubes reduce el total de condensado que se lleva a niveles altos y se pierde por efectos de divergencia horizontal a la precipitación inmediata en tierra, relacionándose el tiempo de iniciación de la precipitación en ese lugar a la velocidad de la corriente de ascenso, los parámetros de distribución de gotas, la eficiencia de recolección y los índices de conversión de nubes.

Para alterar apreciablemente la distribución de lluvia en tierra se requieren cambios relativamente grandes en los parámetros microfísicos, ya que las respuestas de distribuciones del agua en el sistema del modelo usualmente tienden a desviar los efectos de cambios microfísicos.

Se discuten las posibles respuestas de la nubosidad y precipitación a modificaciones de parámetros microfísicos a la luz del modelo, suponiéndose que la distribución de corrientes de ascenso no es afectada por variaciones de perfiles verticales de nubes y precipitación y anotándose también la posible significación de procesos microfísicos para el albedo y clima de la Tierra.

### INTRODUCCION

Al considerar problemas de modificación del tiempo, del ciclo hidrológico y de interpretación de observaciones de nubes y precipitación por radar, satélites artificiales y otros métodos, debe añadirse el conocimiento de las relaciones entre las distribuciones de substancia acuosa y campos de viento. Este estudio se ocupa de las implicaciones de la continuidad en campos de viento especificados y amplía los modelos cinemáticos iniciales (Wexler, H. y D.

\* Basado en investigaciones apoyadas por el U. S. Army Electronics Research and Development Laboratory bajo Contrato DA 36-039 SC 89099. Muchos detalles no discutidos en este trabajo se tratan en los informes del contrato.

\*\* The Travelers Research Center, Inc., Hartford, Conn.

## MICROPHYSICAL PARAMETERS IN RELATION TO TROPICAL CLOUD AND PRECIPITATION DISTRIBUTIONS AND THEIR MODIFICATION \*

EDWIN KESSLER, III. \*\*

### ABSTRACT

Microphysical parameters and the vertical wind profile are considered in relation to the shapes of spatial and temporal distributions of tropical rainfall. For a particular vertical velocity field, the precipitation beneath an updraft center is concentrated relative to that away from the center by increasing relative numbers of small drops in the distribution of rain particles. Increased collection efficiency of rain for cloud and a faster rate of growth of cloud particles reduces the amount of condensate which is carried to high levels and lost by effects of horizontal divergence to the immediate precipitation at the ground. The time of precipitation onset at the ground is related to updraft speed, drop distribution parameters, collection efficiencies, and cloud conversion rates.

Relatively large changes of the microphysical parameters are required to alter the rain distribution at the ground appreciably, because the responses of water distribution in the model system usually tend to offset the effects of the microphysical changes.

Possible responses of cloudiness and precipitation to modification of the microphysical parameters are discussed in the light of the model, with the assumption that the updraft distribution is unaffected by variations of the vertical profiles of cloud and precipitation. The possible significance of microphysical processes for the albedo and climate of the Earth is also noted.

### INTRODUCTION

Considerations of problems of weather modification, of the hydrologic cycle, and of the interpretation of cloud and precipitation observations by radar, artificial satellite, and other means, should be assisted by knowledge of relationships between water substance distributions and wind fields. This study develops the implications of continuity in specified wind fields, and extends earlier kinematic models (Wexler, H. y D. Atlas, 1957 y Kessler, III, E., 1963) to incorporate

\* Based on research supported by the U. S. Army Electronics Research and Development Laboratory under Contract DA 36-039 SC 89099. Many details not discussed in this paper are treated in the reports of the contract.

\*\* The Travelers Research Center, Inc., Hartford, Conn.

Atlas, 1957; Kessler, III, E., 1963) para incorporar procesos microfísicos simplificados al desarrollo temporal de las fases de vapor, nube y precipitación. Se exponen especulaciones sobre efectos de modificación artificial de parámetros microfísicos en el mundo real a partir de papeles calculados de procesos microfísicos en un modelo de sistema de viento. Las interacciones dinámicas entre parámetros microfísicos y las distribuciones de la sustancia acuosa en desarrollo así como la forma e intensidad del campo de viento asociado no se consideran en este trabajo.

### LAS ECUACIONES DE CONTINUIDAD

Las ecuaciones de continuidad que ahora se tratan son

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -u \frac{\partial M}{\partial x} - v \frac{\partial M}{\partial y} - w \frac{\partial M}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial z} MV + Mw \frac{\partial \ln \rho}{\partial z} \quad (1)$$

+ conversión de nube + recolección de nube — evaporación de precipitación  
+ cloud conversion + cloud collection — evaporation of precipitation

$$\frac{\partial m}{\partial t} = -u \frac{\partial m}{\partial x} - v \frac{\partial m}{\partial y} - w \frac{\partial m}{\partial z} + wG + mw \frac{\partial \ln \rho}{\partial z} \quad (2)$$

— conversión de nube — recolección de nube + evaporación de precipitación  
— cloud conversion — cloud collection + evaporation of precipitation

Implícita en ellas existe la siguiente ecuación de continuidad por el aire:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial \ln \rho}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

La derivación de las Ecs. (1) y (2) se detalla en el Informe Núm. 3 (Kessler, III, E. *et al.*, 1962). En la Ec. (1),  $M$  es la densidad de precipitación y se refiere al condensado que tiene una apreciable velocidad de caída en relación al aire;  $V$  es una cantidad negativa que puede ser la velocidad de caída terminal de la partícula de precipitación, cuyo diámetro divide una supuesta distribución de tamaño exponencial inversa (Marshall, J. S. y W. McK. Palmer, 1948) en porciones con igual contenido de agua. Los términos en la densidad del aire indican la compresibilidad de la atmósfera.

En la Ec. (2),  $m$  es la densidad de nubes más la densidad de vapor menos la densidad de vapor de saturación. Cuando  $m$  es positiva representa la densidad de nubes, es decir, el condensado con velocidad de caída terminal cero. Cuando  $m$  es negativa representa el déficit de saturación  $G$ , una función de la altura, define el índice de creación de nubes en corrientes ascendentes saturadas;  $G = -\rho (dQ_s/dz)$  donde  $Q_s$  es el coeficiente de mezcla de saturación de vapor de agua en el aire.

Los restantes términos en las Ecs. (1) y (2), al escribirse en forma matemática, definen los coeficientes de la espontánea conversión de nubes en precipitación, la recolección de partículas de nubes por precipitación y la evaporación de precipitación. Ya que el modelo requiere inmediata evaporación de nubes en aire subsaturado, la evaporación

simplified microphysical processes and the development with time of vapor, cloud, and precipitation phases. From the calculated roles of microphysical processes in a model wind system, speculations are offered regarding effects of artificial modification of the microphysical parameters in the real world. The dynamical interactions between microphysical parameters and developing distributions of water substance, and the shape and intensity of the associated wind field are not considered in this paper.

### THE CONTINUITY EQUATIONS

The continuity equations treated here are

Implicit in these is the following equation of continuity for air:

The derivation of Eqs. (1) and (2) is detailed in Report No. 3 (Kessler, III, E. *et al.*, 1962). In Eq. (1),  $M$  is the density of precipitation and refers to condensate which has an appreciable fall speed relative to the air;  $V$ , a negative quantity, can be the terminal fall velocity of the precipitation particle whose diameter divides an assumed inverse exponential size distribution (Marshall, J. S. and W. McK. Palmer, 1948) into portions of equal water content. The terms in the density  $\rho$  of the air account for the compressibility of the atmosphere.

In Eq. (2),  $m$  is the cloud density plus the vapor density minus the saturation vapor density. When  $m$  is positive, it represents the density of cloud, i.e., condensate with zero terminal fall speed. When  $m$  is negative, it represents the saturation deficit.  $G$ , a function of height, defines the rate of cloud creation in saturated updrafts;  $G = -\rho (dQ_s/dz)$  where  $Q_s$  is the saturation mixing ratio of water vapor in air.

The remaining terms in Eqs. (1) and (2), when written in mathematical form, define rates of spontaneous conversion of cloud to precipitation, the collection of cloud particles by precipitation, and the evaporation of precipitation. Because the model requires immediate evaporation of cloud in subsaturated air, evaporation of precipitation does not

de precipitación no se hace al mismo tiempo y lugar que la conversión y acreción de nubes en cualquier lugar en que existan nubes.

occur at the same time and place as cloud conversion and accretion, or anyplace where cloud exists.

LOS PARAMETROS MICROFISICOS

THE MICROPHYSICAL PARAMETERS

En el presente estudio, los complicados procesos que convierten nubes en precipitación se representan por las simples expresiones

In the present study, complicated processes which convert cloud to precipitation are represented by the simple expressions

$$\begin{aligned} \text{Cloud conversion} &= K_1 (m - a) \text{ gm m}^{-3} \text{ sec}^{-1} \quad (m > a) \\ \text{Cloud conversion} &= 0 \quad (m < a) \end{aligned}$$

El uso de tal simplificación no es claramente apoyado o refutado en la literatura, pero parece razonable en un primer experimento y elimina la necesidad de un mayor número de ecuaciones básicas. Se han dado otras razones (Kessler, III, E. *et al.*, 1962, Informe Núm. 2).

The use of such a simplification is not clearly supported or refuted by the literature, but seems reasonable in a first experiment and obviates the need for a greater number of basic equations. Further discussion is given in (Kessler, III, E. *et al.*, 1962, Report No. 2).

El término de recolección de nubes se deriva como sigue. Nótese que el coeficiente de volumen arrastrado por una gota de diámetro  $D_i$  cayendo a la velocidad  $V_i$  es  $-\pi D_i^2 V_i / 4$  (donde  $V_i < 0$ ) y que el coeficiente de acumulación de agua de nubes por una partícula única de precipitación de masa  $M_i$  es

The cloud collection term is derived as follows. Note that the rate at which volume is swept out by one drop of diameter  $D_i$  falling at a speed  $V_i$  is  $-\pi D_i^2 V_i / 4$  (where  $V_i < 0$ ) and that the rate of accumulation of cloud water by a single precipitation particle of mass  $M_i$  is

$$\frac{\delta M_i}{\delta t} = -\frac{\pi D_i^2}{4} E_i V_i m, \quad (m > 0) \tag{5}$$

donde  $E_i$  es la eficiencia de captura.

where  $E_i$  is the efficiency of catch.

El coeficiente de crecimiento del contenido de agua líquida en una distribución completa de partículas de precipitación se obtiene al multiplicar la Ec. (4) por el número de partículas  $n$  e integrando todos los diámetros de partículas, es decir,

The rate of growth of the liquid water content in an entire distribution of precipitation particles is given by multiplying Eq. (4) by the number of particles  $n$  and integrating over all particle diameters, i.e.,

$$\frac{dM}{dt} = \int_0^\infty \frac{\delta M}{\delta t} n dD \tag{6}$$

Una integración formal se logra substituyendo  $V_i$  en la Ec. (5) según la relación  $V = -130 D^{0.5} m$  seg basado en Spilhaus (1948) y para  $n$  según  $n = n_0 e^{\lambda D m^{-4}}$  (Marshall, J. S. y W. McK. Palmer, 1948). Entonces, con  $E$  independiente de  $D$ ,

A formal integration is accomplished by substituting for  $V_i$  in Eq. (5) according to the relation  $V = -130 D^{0.5} m$ /sec based on Spilhaus (1948), and for  $n$  according to  $n = n_0 e^{\lambda D m^{-4}}$  (Marshall, J. S. y W. McK. Palmer, 1948). Then with  $E$  independent of  $D$ ,

$$\frac{dM}{dt} = \frac{130}{4} \pi E n_0 m \int_0^\infty D^{5/2} e^{-\lambda D} dD; \tag{7}$$

$$\frac{dM}{dt} = \frac{130}{4} \pi E n_0 m \frac{\tau(3.5)}{\lambda^{3.5}} \tag{8}$$

puede demostrarse que  $\lambda = 42 n_0^{.25} M^{-.25}$ /metro. La Ecuación (9) define el coeficiente de recolección de nubes por precipitación y se obtiene substituyendo  $\lambda$  en la Ec. (8):

It can be shown that  $\lambda = 42 n_0^{.25} M^{-.25}$ /meter. Equation (9) defines the rate of collection of cloud by precipitation and is obtained by substituting for  $\lambda$  in Eq. (8):

$$\frac{dM}{dt} (\text{collection}) = 6.96 \times 10^{-4} E n_0^{.125} mM^{.875} \text{ gm/m}^3 \text{ sec} \quad (m > 0) \quad (9)$$

Un modelo aproximado de las funciones de evaporación tabuladas por Kinser y Gunn (1951) lleva a la siguiente ecuación para el coeficiente de evaporación

$$\frac{dM}{dt} (\text{collection}) = 6.96 \times 10^{-4} E n_0^{.125} mM^{.125} \text{ gm/m}^3 \text{ sec} \quad (m > 0) \quad (10)$$

y la velocidad de caída  $V$  de la partícula de precipitación de mediano diámetro de volumen en la supuesta distribución de tamaño es

$$V = -38.6 n_0^{-.125} M^{.125} \text{ m/sec.} \quad (11)$$

#### PAPEL DE LOS PARAMETROS MICROFISICOS EN EL DESARROLLO DE NUBES Y PRECIPITACION

Las soluciones exactas de un modelo de iniciación de precipitación se han presentado en otros lugares (Kessler, III, E. *et al.*, 1962, 1963), mostrando que la existencia de procesos alternos en la producción de precipitación, es decir, conversión de nubes y acreción, implica que la iniciación de la precipitación es particularmente sensible a los más fuertes entre los procesos causales de precipitación. En otras palabras, si los procesos de coalescencia y agregación entre muchas gotitas de nubes son relativamente rápidos, resulta de poco efecto la eficiencia con que se reúnen las gotas de lluvia de nubes respecto al índice de su depleción y que la recolección de nubes por gotas de lluvia es relativamente rápida de modo que la magnitud del índice de conversión de nubes no es crítica siempre que supere a cero.

El papel de los parámetros microfísicos también se ha examinado por integración numérica en un perfil de corriente ascendente fija dentro de una atmósfera inicialmente saturada y se han obtenido ecuaciones omitiendo los términos de advección horizontal y la compresibilidad en las Ecs. (1) y (2). Este modelo se aplica mejor a un cono de aguacero o a una amplia precipitación en que la advección horizontal es baja. Los resultados se resumen aquí y se ilustran en las Figs. 1 y 2, ya que un tratamiento más amplio se da en otra parte (Kessler, III, E. *et al.*, 1963). Estas ilustraciones se basan en los valores de parámetros de la Tabla I, excepto uno de ellos que varía sobre el conjunto de curvas en cada figura.

Las figuras ilustran que en corrientes ascendentes fijas, la alteración de un proceso microfísico o parámetro produce un cambio de distribución de agua que tiende a desviar los efectos del cambio microfísico sobre el índice de precipitación superficial. Por ejemplo, en las Figs. 1b y 2b, la gran recolección de nubes se asocia más prominentemente a su disminución que a un incremento de precipitación.

En todos los casos, las corrientes ascendentes ilustradas son menores que las velocidades de caída, alcanzándose eventualmente condiciones de estado estacionario, independientes de la estratificación de humedad inicial,<sup>1</sup> débil-

<sup>1</sup> Excepto cuando el aire es inicialmente tan seco que su ascenso no produce precipitación.

An approximate modeling of the tabulated evaporation functions of Kinser and Gunn (1951) leads to the following equation for the evaporation rate:

And the fall speed  $V$  of the median volume diameter precipitation particle in the assumed size distribution is

#### ROLE OF MICROPHYSICAL PARAMETERS IN CLOUD AND PRECIPITATION DEVELOPMENT

Exact solutions of a model of the onset of precipitation have been presented elsewhere (Kessler, III, E. *et al.*, 1962, 1963); these show that the existence of alternative processes for precipitation production, e.g., cloud conversion and accretion, implies that precipitation onset is principally sensitive to the stronger of the precipitation forming processes. In other words, if coalescence and aggregation processes among many tiny cloud drops are relatively rapid, the efficiency with which raindrops collect cloud is of little consequence to the rate of depletion of cloud; and if the collection of cloud by raindrops is relatively rapid, then the magnitude of the rate of cloud conversion is not critical, so long as it is more than zero.

The role of microphysical parameters has been further examined by numerically integrating for a fixed updraft profile in an initially saturated atmosphere, the equations obtained by omitting the horizontal advection and compressibility terms in Eqs. (1) and (2). This model best applies to a shower core or to widespread precipitation in which the horizontal advection is small. The results are summarized here and illustrated by Figs. 1 and 2 since a more comprehensive treatment is available in (Kessler, III, E. *et al.*, 1963). These illustrations are based on the parameter values in Table I, except for one parameter which varies over the set of curves in each figure.

The figures illustrate that with fixed updrafts, alteration of a microphysical process or parameter produces a water distribution change which tends to offset the effects of the microphysical change on the surface precipitation rate. For example, in Figs. 1b and 2b, large cloud collection is more prominently associated with decreased cloud than with increased precipitation.

In all cases, the illustrated updrafts are smaller than precipitation fall speeds, and steady-state conditions are eventually attained. These steady states are independent of the initial moisture stratification,<sup>1</sup> weakly dependent on the

<sup>1</sup> Except when the air is initially so dry that ascent of air does not produce precipitation.

TABLA I

TABLE I

PARÁMETROS USADOS EN CÁLCULOS DE DIFERENCIA FINITA	PARAMETERS USED IN FINITE DIFFERENCE COMPUTATION
Velocidad de corriente ascendente — Updraft speed	$w = (4w_{\max}/H) (z - z^2/H) \text{ m sec}^{-1}$
Velocidad máxima de corriente ascen- dente — Maximum updraft speed	$w_{\max} = 0.5 \text{ m sec}^{-1}$
Función generadora tropical — Tropical generating function	$G = (3 \times 10^{-3} - 3 \times 10^{-7}z) \text{ gm m}^{-4}$
Altura de columna de corriente ascen- dente — Height of updraft column	$H = 6,000 \text{ m}$
Parámetro inicial de precipitación — Precipitation onset parameter	$a = 0.5 \text{ gm m}^{-3}$
Índice de conversión de nubes — Cloud conversion rate	$k_1 = 10^{-3} \text{ sec}^{-1}$
Parámetro de distancia en tamaño de precipitación — Precipitation size dis- tance parameter	$N_0 = 10^7 \text{ m}^{-4}$
Eficiencia de recolección — Collection efficiency	$E = 1$

mente dependientes de los parámetros microfísicos y fuertemente dependientes de las corrientes ascendentes.

Donde la conversión de nubes y su acreción transfieren agua de la nube a la fase de precipitación en un corto tiempo comparado con el necesario para levantar un paquete de aire de niveles bajos a altos en una columna de corriente ascendente, el índice de precipitación superficial constante bajo la columna de la corriente ascendente es aproximadamente igual al índice de condensación integrado en toda la altura de la columna. Esta igualdad aproximada caracteriza todos los casos ahora ilustrados. Pero, la precipitación se acumula en el centro de la corriente ascendente (a expensas de la alejada del centro; ver Kessler, III, E., 1963; Kessler, III, E. *et al.*, 1962, para detalles) en tanto que la velocidad media de caída de las partículas de precipitación desciende, es decir, al aumentar  $N_0$ .

Por otro lado, cuando el tiempo requerido para transferencia de nube a precipitación es largo en comparación con el tiempo de ascenso de paquetes de aire, el índice de precipitación bajo la columna de la corriente ascendente es pequeño en comparación con el índice de condensación integrada; en tales casos mucho del condensado se expande lateralmente hasta altos niveles por la divergencia horizontal que necesariamente acompaña a todas las corrientes ascendentes. La nube así extendida arriba puede originar precipitación en lugares lejanos del centro de la corriente ascendente o puede evaporarse como corriente descendente según la forma del campo de viento tri-dimensional. Para la corriente ascendente máxima de 0.5 m/seg de los ejemplos ilustrados, existen índices de precipitación estacionaria con-

microphysical parameters and strongly dependent on the updrafts.

Where cloud conversion and accretion transfer water from cloud to the precipitation phase in a short time compared to the time taken for an air parcel to rise from low to high levels in an updraft column, the steady surface precipitation rate beneath the updraft column is approximately the same as the condensation rate integrated through the depth of the column. This approximate equality characterizes all of the cases illustrated here. However, the precipitation is concentrated at the updraft center (at the expense of that away from the center; see Kessler, III, E., 1963; Kessler, III, E. *et al.*, 1962 for details) as the average fall speed of the precipitation particles decreases, i.e., as  $n_0$  increases.

On the other hand, when the time required for transfer from cloud to precipitation is long compared to the time of ascent of air parcels, the precipitation rate beneath the updraft column is small compared to the integrated condensation rate; much of the condensate in such cases is spread laterally at high levels by the horizontal divergence which necessarily accompanies all updrafts. The cloud so spread aloft may fall as precipitation at places removed from the updraft center or may evaporate in downdrafts, depending on the shape of the three-dimensional wind field. For the 0.5 m/sec maximum updraft of the illustrated examples, steady precipitation rates considerably less than condensation rate occur only when cloud conversion rates and

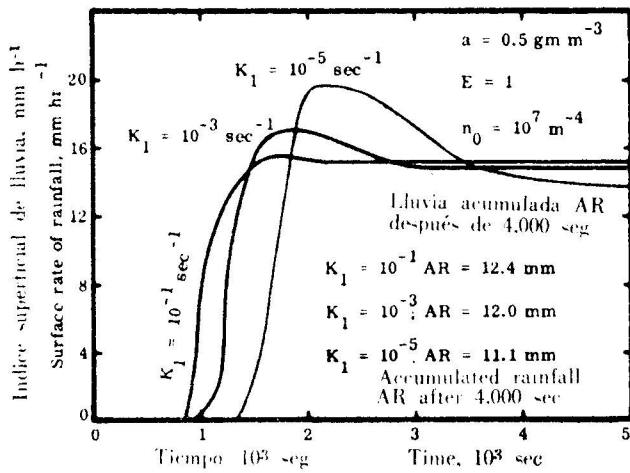


Fig. 1a. Coeficiente de precipitación vs tiempo en superficie para tres magnitudes del parámetro de conversión  $k_1$ .

Fig. 1a. Precipitation rate vs time at the ground for three magnitudes of the conversion parameter  $k_1$ .

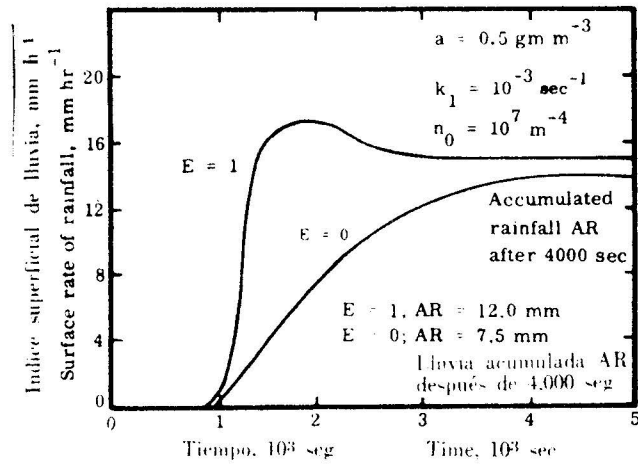


Fig. 1b. Precipitado en superficie para extremos de eficiencia de recolección  $E$ . Cuando  $E = 0$ , la nube cambia a precipitación por la sola acción de la conversión de nube.

Fig. 1b. Precipitate at the ground for extrema of the collection efficiency  $E$ . When  $E = 0$ , cloud conversion acting alone changes cloud to precipitation.

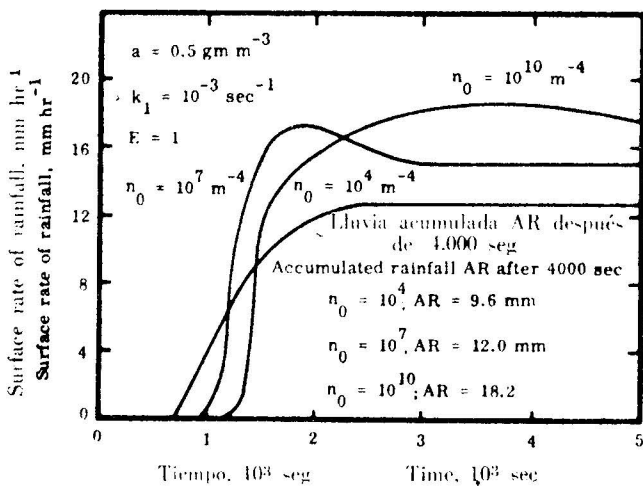


Fig. 1c. Desarrollo de precipitación para tres valores de  $n_0$ . Cuando  $n_0 = 10^{10}$ , el mayor contenido en agua de precipitación forma gotas más pequeñas y de llovizna.

Fig. 1c. Development of precipitation for three value of  $n_0$ . When  $n_0 = 10^{10}$ , most of the precipitation water content is contained in drizzle-size and smaller drops.



Fig. 2a. Perfiles de estado estacionario del contenido de nubes y precipitación para tres valores del parámetro de conversión.

Fig. 2a. Steady cloud and precipitation content profiles for three values of the conversion parameter.

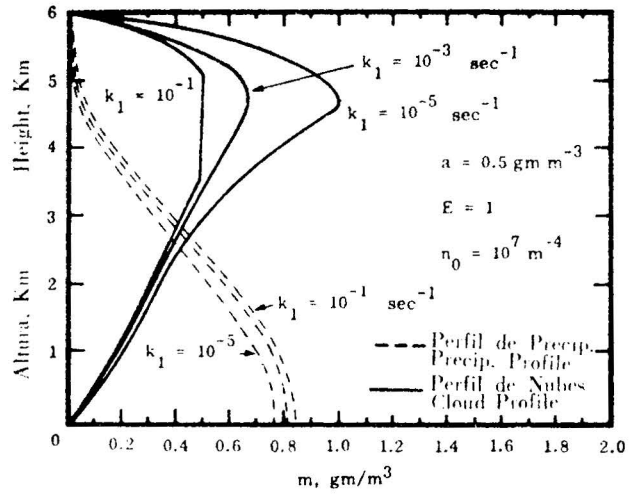


Fig. 2b. Perfiles de estado estacionario del contenido de nubes y precipitación para extremos de eficiencia de recolección.

Fig. 2b. Steady-state profiles of cloud and precipitation content for extremes of the collection efficiency.

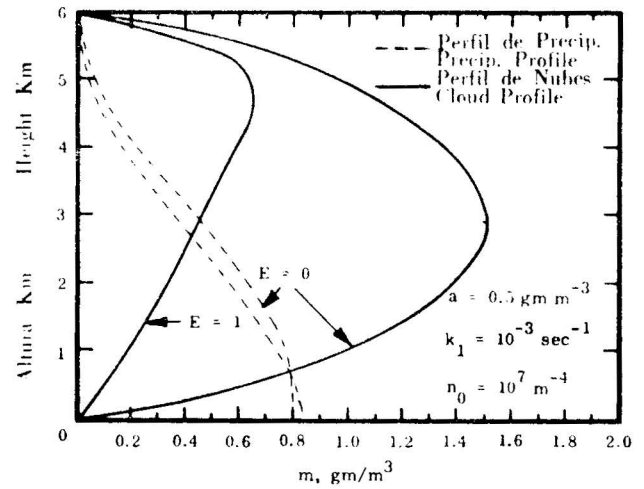
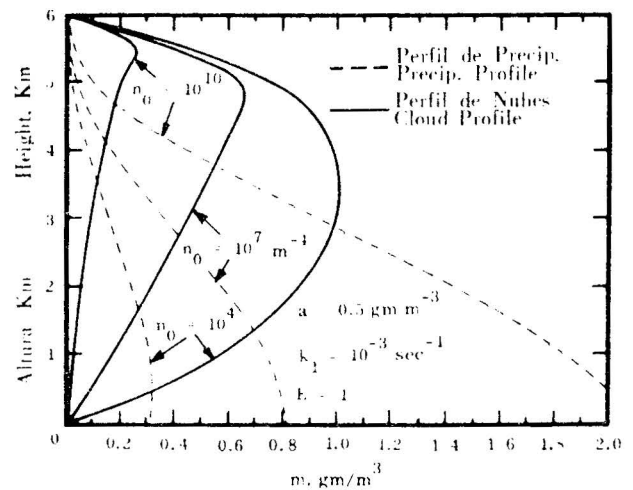


Fig. 2c. Perfiles de estado estacionario del contenido de nubes y precipitación para tres magnitudes de  $n_0$ ,  $n_0 = 10^7$  es típico de lluvias naturales.

Fig. 2c. Steady-state profiles of cloud and precipitation content for three magnitudes of  $n_0$ ,  $n_0 = 10^7$  is typical of natural rains.



siderablemente menores que los índices de compensación sólo donde los índices de conversión de nubes y eficiencias de recolección son simultáneamente pequeñas.

#### IMPLICACIONES PARA MODIFICAR EL TIEMPO

Consideremos ciertos cambios en distribuciones de sustancia acuosa implicados por cambio de parámetros microfísicos. Cuando los índices de conversión de nubes y de recolección son más pequeños el inicio de la precipitación por aguaceros transitorios se retarda; en una situación advectiva ese retardo se asociaría con un desplazamiento viento abajo de la precipitación en tierra. Las Figuras 2a, b y c muestran cómo se asocian probablemente la conversión de nubes y la recolección con mayores cantidades de nubes en el aire en una situación influenciada orográficamente ya que alguna nube en exceso puede ser llevada sobre las montañas para contribuir a la precipitación en el lado opuesto, ordinariamente seco, con pérdida de precipitación relativamente innecesaria en el otro lado. Si las gotas de lluvia pudieran ser menores que su tamaño natural caerían más despacio y la probabilidad de precipitación significativa viento abajo y sobre una cresta aumentarían. El total de nubes asociadas con numerosas gotas más pequeñas probablemente se reduciría, tal como se señala en la Fig. 2c.

Si los índices de conversión y acreción fueran reducidos en ciertos casos, la precipitación disminuiría y el total de nubes en evaporación en las ramas descendentes de la circulación aumentaría. La humedad no precipitada se retendría en la atmósfera y tal vez contribuyese a futuras precipitaciones desde la masa de aire. Squires y Twomey (1960), en su estudio de diferencias entre cumuli continentales y marítimos, han mencionado la ausencia de núcleos gigantes de sal en el aire continental y la presencia de muchos pequeños núcleos y gotas de lluvia como explicación de una notable insuficiencia de nubes continentales respecto a caída de lluvia cálida.

Si los índices de conversión y acreción fueran mayores en casos particulares, la precipitación comenzaría más pronto y su índice de estabilidad aumentaría con tal que no fuera tan grande como el índice de condensación. Aunque los ejemplos ilustrados en las figuras de este trabajo se caracterizan por un casi equilibrio entre índices de precipitación y condensación estables, en realidad las ecuaciones son apropiadas para analizar casos importantes en que no existe ese equilibrio.

Puede intentarse modificar la distribución de la precipitación tropical seleccionando una región donde su régimen claramente sea estable y las trayectorias de aire conocidas o medibles. Tales áreas existen a veces en las Islas Hawaii y probablemente alrededor de la meseta central de México y otras partes. Los análisis de las situaciones de tiempo, incluyendo la medición del contenido en agua de nube y distribuciones de precipitación superficial darían valores aproximados de parámetros microfísicos y corrientes ascendentes que entrarían en un análisis cuantitativo indicando beneficios apreciables resultantes de su modificación artificial. La

collection efficiencies are simultaneously small.

#### IMPLICATIONS FOR WEATHER MODIFICATION

Consider some changes of water substance distributions implied by changes of the microphysical parameters. When the cloud conversion and collection rates are smaller, the onset of precipitation from transient showers is delayed; in an advective situation, such delay would be associated with a downwind displacement of precipitation at the ground. Figures 2a, b, c show how reduced cloud conversion and collection rates are probably associated with larger amounts of cloud aloft, in an orographically influenced situation, some of the increased cloud might be carried over mountains to contribute to precipitation on the ordinarily dry lee side, with loss of relatively unneeded precipitation at windward. If rain drops could be made smaller than natural size, they would fall more slowly, and the probability of significant precipitation downwind and over a ridge would rise. Cloud amounts associated with more numerous smaller drops would probably decrease, however, as suggested by Fig. 2c.

If cloud conversion and accretion rates were made smaller in a particular case, rainfall would decrease and the amount of cloud evaporating in the descending branches of the circulation would increase. Moisture not precipitated would be retained in the atmosphere and possibly contribute to future precipitation from the air mass. Squires and Twomey in their study of differences between continental and maritime cumuli (1960) have cited the absence of giant salt nuclei in the continental air and the presence there of many small nuclei and cloud drops, as explanation for a noticeable inefficiency of the continental clouds with respect to the release of warm rain.

If cloud conversion and accretion rates were made larger in a particular case, rainfall would start sooner and its steady rate would increase, provided that the rainfall rate is not already as great as the rate of condensation. Although the examples illustrated by the figures in this paper are characterized by a near balance between steady precipitation and condensation rates, the equations are equally appropriate for analyses of important cases where such a balance does not prevail.

Attempts to modify the distribution of tropical precipitation might start by selecting a region where its regime is nearly steady and air trajectories known or measurable. Such places exist at times in the Hawaiian Islands, and probably around the central plateau of Mexico and elsewhere. Analyses of the weather situations, including measurements of cloud water contents and of the distributions of surface rainfall, should indicate approximate values of microphysical parameters and updrafts which could be incorporated into a quantitative analysis to show whether appreciable benefits would accrue from their artificial modifi-



conversión de nubes podría aumentarse introduciendo cantidades relativamente pequeñas de núcleos gigantes de sal y gotas de agua. Esa conversión podría disminuirse introduciendo grandes cantidades de muy pequeños núcleos; Weickmann (1963) ha presentado un análisis cuantitativo preliminar de tal idea y una discusión de los pertinentes experimentos de campo. Puede disminuirse el tamaño de las gotas de lluvia introduciendo un agente superficial activo que baje su tensión superficial y aumente su diseminación. Si es importante puede suprimirse un proceso de enfriamiento introduciendo sustancias orgánicas que se absorban en la superficie de los núcleos de congelación al disminuir su temperatura de activación (Birstein, S. J., 1954).

En estudios de modificación del tiempo la teoría cinemática ahora discutida puede ser un instrumento útil, esperándose resultados más valiosos por análisis del balance acuoso en campos de viento por modelos bi-dimensionales rectilíneos y radialmente simétricos (Kessler, III, E., 1963) y por modelos que combinan ecuaciones termodinámicas y de continuidad para la sustancia acuosa.

#### PARAMETROS MICROFISICOS Y CLIMA GLOBAL

La nubosidad de la atmósfera de la Tierra depende ampliamente de la estabilidad coloidal de las nubes. Cuando la conversión y acreción de las nubes es muy pequeña, hay menor precipitación o acumulación en la superficie y una mayor porción del condensado se evapora a niveles altos sea en aire relativamente seco y difusivamente arrastrado o en corrientes descendentes que acompañan a las ascendentes. Si tales parámetros microfísicos se redujeran a escala global, podría lograrse un nuevo estado de equilibrio estadístico en una atmósfera con mayor cantidad de nubes que tendiesen a perder su reducida efectividad como productoras de precipitación. El aumento de nubosidad significativa se asociaría con un incremento del albedo y otros cambios que no pueden tratarse sin referencia a una teoría o modelo consistente. Sin embargo, no parece ocioso especular que el nuevo equilibrio podría asociarse con temperatura media más baja en la superficie de la Tierra. Si se confinaran los cambios de parámetros microfísicos a regímenes caliente (coalescencia) o frío (cristales de hielo) o si fueran substancialmente diferentes de ambos, la forma del perfil latitudinal medio de la temperatura podría alterarse con nuevas consecuencias para el carácter e intensidad de la circulación general. ¿Podrían las variaciones de los procesos microfísicos ser la clave de alteraciones apreciables de la nubosidad atmosférica y del clima mundial en tiempos prehistóricos e históricos?

Cloud conversion might be assisted by introduction of relatively small numbers of giant salt nuclei and water drops. Conversion might be decreased by introducing very large number of very small nuclei; Weickmann (1963) has presented a preliminary quantitative analysis of this idea and a discussion of related field experiments. Rain drops might be made smaller by introducing a surface-active agent to reduce the drops' surface tension and promote breakup. Where important, a freezing process might be suppressed by introduction of organic substances which become absorbed on the surfaces of freezing nuclei a lowering of their activation temperature (Birstein, S. J., 1954).

In weather modification studies, the kinematic theory discussed here should be a useful tool. More valuable results are expected from analyses of water budgets in two-dimensional rectilinear and radially symmetric model wind fields (Kessler, III, E., 1963), and from a model which combines thermohydrodynamic equations with continuity equations for water substance.

#### MICROPHYSICAL PARAMETERS AND GLOBAL CLIMATE

The cloudiness of the Earth's atmosphere depends largely on the colloidal stability of clouds. When cloud conversion and accretion are smaller, less precipitation is formed and deposited at the ground, and a greater portion of condensate evaporates at high levels, either in relatively dry air diffusively entrained, or in the downdrafts which accompany updrafts. If these microphysical parameters were reduced on a global scale, a new state of statistical equilibrium might be attained by an atmosphere where a greater plenty of clouds would tend to offset their reduced effectiveness as precipitation producers. Significantly increased cloudiness would be associated with an increase of the albedo with accompanying changes which can not be rationally treated without reference to a consistent theory or model. It does not seem amiss, however, to speculate that the new equilibrium would be associated with a lower average temperature of the Earth's surface. If changes of the microphysical parameters were confined to either of the warm (coalescence) or cold (ice-crystal) regimes, or if changes were substantially different for these two regimes, the shape of the mean latitudinal profile of temperature might be altered, with further consequences for the shape and intensity of the general circulation. Might variations of the microphysical processes be a key to appreciable alterations of the atmosphere's cloudiness and world climates in prehistoric and historic time?

#### BIBLIOGRAFIA

- BIRSTEIN, S. J. 1954. Adsorption Studies of Heterogeneous Phase Transitions. *Geophysical Research Papers*, No. 31, Air Force Cambridge Research Center, Bedford., Mass.
- KESSLER, III, E. 1963. Elementary Theory of Relation between Atmospheric Motions and Distribution of Water Content. *Mo. Weather Rev.*, 91(1):
- KESSLER, III, E., P. J. FETERIS & E. A. NEWBURG. 1962-1963. Relationships between

#### BIBLIOGRAPHY

- Tropical Precipitations and Kinematic Cloud Models. Progress Reports from Travelers Research Center to Department of the Army on Contract DA 36-039 SC 89099.
- 1963. Role of Microphysical Processes in shaping Vertical Profiles of Precipitation and Cloud. *Proc. 10th. Weather Radar Conf.*, Boston, Mass.
- KINSER, G. D. & R. GUNN. 1951. The Evaporation, Temperature and Thermal Relaxation Time of Freely Falling Weather Drops. *Jour. Meteorology*, 8(2):
- MARSHALL, J. S. & W. MCK. PALMER. 1948. The Distribution of Rain Drops with Size. *Jour. Meteorology*, 5(4):
- SPIILHAUS, A. F. 1948. Raindrop Size, Shape and Falling Speed. *Jour. Meteorology*, 5(4):
- SQUIRES, P. & S. TWOMEY. 1960. The Relation between Cloud Drop Spectra and the Spectrum of Cloud Nuclei. *Geophysical Research Monograph*, No. 5, American Geophys. Union, Washington, D. C.
- WEXLER, H. & D. ATLAS. 1957. Moisture Supply and Growth of Stratiform Precipitation. *Jour. Meteorology*, 15(6):
- WEICKMANN, H. 1963. Condensation Nuclei Seeding, A New Technique and its Objective for Cloud Modification. Paper presented at the Paris Symposium on Condensation Nuclei, May 1963.