

GEOFISICA INTERNACIONAL

REVISTA DE LA UNIÓN GEOFÍSICA MEXICANA, AUSPICIADA POR EL INSTITUTO DE GEOFÍSICA DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Director: Julián Adem

Subdirector: Manuel Maldonado-Koerdell

Vol. 5

Mexico, D. F., 1o. de Abril de 1965

Núm. 2

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

México, D. F., Jun. 6-12, 1963

7a. SESIÓN

7th. SESSION

CONVECCIÓN E INTERCAMBIO AIRE-MAR-TIERRA
CONVECTION AND AIR-SEA-EARTH EXCHANGE

*CONVECCION TROPICAL Y CAMBIO EN LA
FRONTERA AIRE-MAR, UNA REVISION **

*TROPICAL CONVECTION AND AIR-SEA
BOUNDARY EXCHANGE, A SURVEY **

JOANNE S. MALKUS **

JOANNE S. MALKUS **

Además de su íntima liga física, la convección y el cambio en la frontera aire-mar tienen en común necesitar ambas una mejor comprensión. Los estudios en cada una de estas áreas encaran formidables barreras; en cada caso podría caracterizarse la barrera como interacción de movimientos atmosféricos a muchas escalas que pueden empujarse, estorbarse, romperse y estimularse mutuamente. En particular estas interesantes e intrincadas interacciones pueden subdividirse en turbulencia de capa limitante, por una parte e interacción a escala seleccionada de movimiento con las circulaciones mayores en las escalas meso- y sinóptica, por otra. Para ilustrar las dificultades y lo que puede hacerse con ellas, comenzaremos por una breve revisión de cada tópico por separado y más tarde trataremos de establecer una conexión entre ellos especificando líneas de ataque prometedoras.

CONVECCION

Desde la II Guerra Mundial el progreso en convección ha sido poco menos que revolucionario. Los avances corresponden principalmente a cuatro áreas:

* U.C.L.A., Departamento de Meteorología, Trabajos en Meteorología, Núm. 87.

** Universidad de California en Los Angeles.

In addition to their close physical linkage, convection and air-sea boundary exchange have the further tie of both being in need of a major breakthrough. Studies in each of these areas are approaching formidable barriers; in each case the barrier might be categorized as the interaction of the many scales of atmospheric motions, which may drive, hinder, brake, and energize each other. In particular, these interestingly troublesome interactions may be subdivided into boundary layer turbulence on the one hand, and on the other, interaction of the chosen scale of motion with larger circulations on the meso- and synoptic scale. To illustrate the difficulties and what might be done about them, we shall begin with a brief review of each topic separately and proceed later to forging a connection between them and specifying hopeful lines of attack.

CONVECTION

Since World War II, progress in convection has been little short of revolutionary. The advances mainly in four areas,

* U.C.L.A., Department of Meteorology, Papers in Meteorology, No. 87.

** University of California at Los Angeles.

- 1—Estudios de elementos de convección individuales;
- 2—Documentación sobre el papel de las nubes convectivas en circulaciones tropicales a las más grandes escalas;
- 3—Tratamiento estadístico-teórico completo de la convección totalmente turbulenta bajo condiciones muy simplificadas;
- 4—Estudios de configuraciones de nubes de convección a varias escalas en la atmósfera.

Primero consideraremos los elementos de convección individuales. Existen ahora detalladas observaciones de aviones y deslizadores (Levine, J., 1963; Cunningham, R. M., 1959; Talford, J. W. y J. Warner, 1962; Woodward, B., 1962), que abarcan perfiles de corrientes ascendentes y de agua líquida, así como de temperatura y humedad. Tenemos estudios cinematográficos cuantitativos de lapsos de tiempo reunidos ocasionalmente por radar (Saunders, P. M. y C. Boone, 1962), limitados modelos teóricos y numéricos (Levine, J., 1959; Lilly, D., 1962) y experimentos controlados de laboratorio (Saunders, P. M., 1962). Es consolador que la literatura de valor sobre ambos tópicos tenga demasiada extensión para citarse aquí, excepto algunos de los más recientes estudios. También debe mencionarse que la eclosión de programas en los últimos 1940 y 1950 haya disminuido notablemente en los pasados tres años.

Al revisar modelos de convección no volveré atrás ni comenzaré de nuevo con el modelo de paquete y la postulación del arrastre por Stommel (1947). El hecho de que todos hayan oído acerca de este desarrollo hasta la exasperación es suficiente prueba de que se necesita algo nuevo respecto al elemento convectivo.

Hace cerca de diez años se producían cálidos debates sobre la forma que tomaba la convección y las gentes peleaban sobre si debíamos llamar columna, burbuja, chorro, hongo, anillo de vórtice o termal a un elemento de cumulus. De hecho una llamada "teoría" se agregó a casi todos estos nombres, por sus atractivos rasgos, supuestos drásticos y limitaciones severamente criticadas. Creo que todos comprendemos que una convección puede tomar muchas formas diferentes en las condiciones iniciales y de ambiente, ya que el argumento se rechaza o debiera rechazarse al examinar atentamente la delineación cuantitativa de criterios de aparición de las diferentes formas.

Respecto al arrastre estamos algo más cerca de su centro de lo que Stommel pensaba en 1947 cuando lo reconoció como proceso turbulento y proporcionó los medios para calcular la dilución de cumulus a partir de observaciones expeditas de aviones. Todavía el arrastre es una interacción turbulenta poco explorada entre las escalas convectiva y más pequeña de movimientos; así que lo que se ha ganado principalmente con experimentos de laboratorio sobre su mecanismo indica que los elementos de cambio de un termal están en las protuberancias que semejan una coliflor (Saunders, P. M., Scorer, H. S. y C. Bonne, 1956; Woodward, B., 1959).

Sin embargo, la importancia del arrastre ha sido bien comprobada (Malkus, J. S., 1952 y 1954). Es el freno crítico

- 1—Studies of individual convection elements,
- 2—Documentation of the role of convective clouds in larger-scale tropical circulations,
- 3—Complete statistical-theoretical treatment of fully turbulent convection under very simplified conditions,
- 4—Studies of convection cloud patterns on several scales in the atmosphere.

First let us consider individual convection elements. There are now detailed aircraft and glider observations (Levine, J., 1963; Cunningham, R. M., 1959; Talford, J. W. y J. Warner, 1962; Woodward, B., 1962), some including updraft and liquid water profiles, as well as those of temperature and humidity. We have quantitative time-lapse motion picture studies, occasionally put together with radar (Saunders, P. M. y C. Bonne, 1962), limited theoretical and numerical models (Levine, J., 1959; Lilly, D., 1962) and controlled laboratory experiments (Saunders, P. M., 1962). It is gratifying that the worthwhile literature on these topics is too extensive to cite here any but a few most recent studies. It is also noteworthy that the burst of progress of the late 1940's and 1950's has noticeably slowed down in the past three years.

In reviewing convection models, I shall not go back and start again with the parcel model and the postulation by Stommel (1947) of entrainment. The fact that everyone has heard this development to the point of exasperation is sufficient evidence that something new is needed regarding the convection element.

About ten years ago, heated debates used to rage about what form convection took. People became irate about whether we should call a cumulus element a column, bubble, jet, mushroom, vortex-ring, or thermal. In fact, a so-called "theory" has been tagged with almost every one of these names, each with attractive features, drastic assumptions, and severely criticizable shortcomings. I think we all realize now that convection can take many different forms depending on initial and ambient conditions; the argument is or should be adjourned and attention turned to quantitative delineation of the criteria for the appearance of the different forms.

Concerning entrainment, we are little nearer its heart than Stommel first took us in 1947, when he both recognized it as a turbulent process and provided us the tools to compute cumulus dilution from readily made aircraft observation. Entrainment remains an almost unexplored turbulent interaction between the convective and smaller scales of motion; what little insight we have gained about its mechanisms derives mainly from laboratory experiments (Saunders, P. M., Scorer, H. S. y C. Bonne, 1956; Woodward, B., 1959) which identify the exchange elements of a thermal as its cauliflowerlike protuberances.

The importance of entrainment, however, has been well documented (Malkus, J. S., 1952 y 1954). It is the critical

sobre el crecimiento de cumulus que sólo parece ser inefectivo cuando el diámetro de la torre de nubes se ensancha y protege por consiguiente los núcleos internos no diluidos por medio de una gran masa periférica. Nadie ha podido aún decir mucho sobre la magnitud de diámetro de la torre así formada, pero hemos comprobado (Riehl, H. *et al.*, 1959; Malkus, J. S. *et al.*, 1961 y 1962), que su existencia requiere convergencia en el flujo a gran escala, es decir, control de circulaciones a escala sinóptica que actúen sobre desarrollos a escala convectiva y que deben ser vistos a esa gran escala para entenderse.

La integración de una "ecuación de entidad" para el índice de ascenso de un elemento de convección, es decir, la *aceleración vertical = fijación menos arrastre* ha rendido cada vez menos frutos (Malkus, J. S. y R. T. Williams, 1963), aun cuando se convirtiera en tratable suponiendo que el arrastre es inversamente proporcional al diámetro y responsable de la máxima reducción en anclaje y arrastre. El diámetro del elemento debe ser especificado entonces y predicho el índice de ascenso, anclaje, etc., que se determinan por consecuencia como funciones de altura para un ambiente dado y unas condiciones iniciales. Tales relaciones se ajustan generalmente a las observaciones, pero al mismo tiempo obtenemos el paradójico resultado de que las altas torres se desarrollarían mejor en la atmósfera tropical media que en la atmósfera del huracán medio(!).

La cosa es que la atmósfera tropical media no produce torres de gran diámetro en tanto que la atmósfera del huracán lo hace, ilustrando que la perturbación a escala sinóptica no origina como se creía antes, gigantescas torres de nubes simplemente con apoyo de una profunda capa húmeda ya que la interacción a escala de movimiento es más compleja y probablemente dinámica, a lo menos de modo parcial.

Tales dificultades sugieren un aproximación numérica para tratar el elemento de convección como campo de movimiento en autodesarrollo más que una entidad prefijada. Se han hecho algunos estimulantes avances (Malkus, J. S. y G. Witt, 1959; Berkofsky, L., 1960; Ogura, Y. y H. A. Phillips, 1962) en tal dirección, aunque se necesita precaución para continuarlos. Primeramente, no sabemos cómo introducir o parametrizar el vital proceso de arrastre o cualquier clase de fricción convectiva. Después, el tratamiento con retícula de diferencia finita tiene sus propios problemas que agregar, especialmente en un problema físicamente inestable y no-lineal, que abarca el aumento de pequeñas escalas de movimiento o su distorsión de la solución bajo una pretendida y falsa gran escala, rápido crecimiento de errores de truncación y artificial eliminación debida al tratamiento de las derivadas por diferencia finita.

Debe dudarse de la utilidad de elegantes modelos con cambio de fase de vapor de agua hasta que sean mejor encarados los problemas numéricos y de mezcla básicos. Los modelos numéricos pueden resultar más fructíferos en las fases muy tempranas de organización de un termal o cumulus antes de dominar tales dificultades. Así, tal vez pueda investigarse la influencia de un flujo a gran escala del tamaño de los elementos en formación. Sin embargo, se requie-

brake upon cumulus growth which seems only to become ineffective as cloud tower diameter gets wider and undiluted inner cores are thereby protected by a large peripheral mass. No one has yet been able to say mucho about how large diameter towers form, but we have documented (Riehl, H. *et al.*, 1959; Malkus, J. S. *et al.*, 1961 and 1962) that their existence requires convergence in the large-scale flow, that is to say, synoptic-scale circulations control the convective-scale developments and these developments must be viewed in the larger-scale context to make sense.

Integration of the "entity equation" for the rate of rise of a convection element, namely, *vertical acceleration = buoyancy minus drag* has reached diminishing returns (Malkus, J. S. y R. T. Williams, 1963) even when rendered readily tractable by the assumption that entrainment is inversely proportional to diameter and is responsible for the major buoyancy reduction and drag. The diameter of the element must then be specified and the predicted rate of rise, buoyancy, etc., are thereby determined as functions of height for given ambient and initial conditions. These relationship check usefully with observations, but at the same time we obtain the paradoxical result that huge towers would grow better in the mean tropical atmosphere than in the mean hurricane atmosphere(!).

The point is that the mean tropical atmosphere does not produce large diameter towers while the hurricane atmosphere does, illustrating that the synoptic-scale disturbance does not produce giant cloud towers simply by building up a deep moist layer as was once believed; the scale-of-motion interaction is more complex and probably at least partially dynamic.

These difficulties suggest a numerical approach treating the convection element as a self-developing field of motion rather than a pre-given entity. Some encouraging starts (Malkus, J. S. y G. Witt, 1959; Berkofsky, L., 1960; Ogura, Y. y H. A. Phillips, 1962) in this direction have been made but great caution is required in pursuing them further. Firstly, we do not know how to introduce or to parameterize the vital process of entrainment or any kind of convective friction for that matter. Secondly, the finite difference grid approach has problems of its own to contribute, particularly in a non-linear, physically unstable problem. These include blow-up of small scales of motion or their distortion of the solution under a false large-scale alias, rapid growth of truncation errors and artificial damping due to the finite difference approximation to derivatives.

One must doubt the usefulness of fancy models with phase change of water vapor until the basic numerical and mixing problems are more adequately faced. Numerical models might prove more fruitful in the very early organization phases of a thermal or cumulus before these difficulties dominate. Thus perhaps the influence of the large-scale flow on the size of elements forming could be investigated. Nevertheless, some brilliant physical insight and

rirá alguna clara estimación física, el aislamiento y la parametrización de los procesos vitales, conocer los rasgos del flujo a gran escala que deben introducirse en el modelo de convección y el índice de simplificación de ambas escalas. Mi conclusión firme es que la ruta prometedora a seguir debe resultar de cuidadosos experimentos comparativos y observaciones; de convección oceánica tropical bajo condiciones no-perturbadas y perturbadas; de ambas "artificialmente" modificadas por el flujo sobre islas calentadas y por convección en el laboratorio.

Concomitantemente al desarrollo de modelos de convección de arrastre se ha reconocido y documentado el papel de las nubes en cumulus en el mantenimiento de las circulaciones tropicales a gran escala. Se comenzó con la demostración del ascenso de cumuli de alisios y el debilitamiento de la inversión del viento de alisios que crea la presión inicial que mantiene su circulación permanente (Riehl, H. *et al.*; 1951; Riehl, H. y J. S. Malkus, 1957; Malkus, J. S., 1956). Entonces se encontró que eran necesarios cumulonimbi fijos para mantener el transporte de energía vertical en la vaguada ecuatorial (Riehl, H. y J. S. Malkus, 1958); solamente unos cuantos miles de activas "torres calientes" en un momento bastaban para tener la función de la caldera en una máquina calórica y condensar todo el vapor de agua que distribuyan ecuatorialmente los alisios. La hipótesis de la "torre caliente" culminó con un modelo de huracán de estado estacionario (Malkus, J. S. y H. Riehl, 1960) demostrando que la liberación de calor latente por unos cuantos cientos o menos de nubes gigantesca era adecuada para mantener el gradiente de presión que originaba los furiosos vientos. Este modelo de huracán maduro fue recientemente ampliado para abarcar las capas de flujo de salida y se ha verificado con las ahora extensas observaciones en la biblioteca del N.H.R.P. (Riehl, H., 1963).

Un episodio muy diferente, pero tal vez aún más importante, en los estudios de convección ha sido el tratamiento teórico más fundamental y riguroso de la convección completamente turbulenta entre dos placas que se mantienen a diferente temperatura (Malkus, W.V.R., 1954). Este estudio pronostica sin constantes eliminables (como funciones de números de Rayleigh y Prandtl) los espectros de convección, el perfil de temperatura media y los momentos de fluctuación sobre el promedio tales como variaciones de temperaturas r.m.s. y velocidad. Tales resultados llevaron a la postulación de principios generales y poderosos que gobiernan el flujo del fluido como la "estabilidad relativa" aplicada en forma burda por el Prof. Riehl y la autora al huracán natural (Riehl, H. y J. S. Malkus, 1958). Conoceremos más de ello y su aplicación al desarrollo de huracanes en la última sesión general de esta conferencia.

Este tratamiento de la convección hasta ahora es rigurosamente aplicable sólo a las situaciones y geometrías más simples; debemos recalcar que nada dice de los mecanismos de elementos fijos individuales, pues apenas los trata estadísticamente. Sin embargo, ha proporcionado conceptos y un lenguaje de investigación para la convección geofísica

both isolation and parameterization of the vital processes will be required to know what features of the large-scale flow need be introduced into the convection model and how much can both scales be simplified. It is my firm conclusion that the fruitful track to follow must be suggested by careful comparative experiments and observations: of tropical oceanic convection under undisturbed and disturbed conditions, of both these "artificially" modified by flow over heated islands, and of convection in the laboratory.

Concomitant with the development of entraining convection models has been the recognition and documentation of the role of cumulus clouds in maintaining the large-scale tropical circulations. This began with the demonstration of how trade cumuli raise and weaken the trade-wind inversion and create the pressure head maintaining the steady trade flow (Riehl, H. *et al.*, 1951; Riehl, H. y J. S. Malkus, 1957; Malkus, J. S., 1956). Then buoyant cumulonimbi were found necessary to maintain the vertical energy transport in the equatorial trough (Riehl, H. y J. S. Malkus, 1958); only a few thousand "hot towers" active at a time are enough to perform the firebox function in the heat engine and condense all the water vapor shipped equatorward by the trades. The "hot tower" hypothesis culminated in a steady state hurricane model (Malkus, J. S. y H. Riehl, 1960) demonstrating how the latent heat release by a few hundred or less giant clouds was adequate to maintain the pressure gradients that drive the furious winds. This nature hurricane model was recently extended to include the outflow layers and has been tested against the now extensive library of N.H.R.P. observations (Riehl, H., 1963).

A quite different but perhaps even more important landmark in convection studies has been the more fundamental and rigorous theoretical treatment of fully turbulent convection between two plates held at different temperature (Malkus, W.V.R., 1954). This study predicts without disposable constants (as functions of the Rayleigh and Prandtl numbers) the spectrum of the convection, the mean temperature profile, and the moments of the fluctuations about the mean, such as the r.m.s. temperature and velocity variations. These results led to the postulation of powerful and general principles governing fluid flow, such as that of "relative stability" which was applied in crude form by Prof. Riehl and the author to the mature hurricane (Riehl, H. y J. S. Malkus, 1958). We shall learn more of it and its application to hurricane development in the last general session of this conference.

This approach to convection has so far been rigorously applicable only to the simplest situations and geometries; we must emphasize that it says nothing of the mechanisms of individual buoyant elements but only treats these statistically. It has, however, provided insight and a language of enquiry for the more complex geophysical convection,

más compleja, como ahora lo sugerimos respecto a la configuración de nubes.

En tanto que los modelos de cumulus individuales chocan contra el muro de la interacción de escalas de movimiento grandes y pequeñas, podemos postular que aquéllas son las más importantes, por ejemplo, el mismo proceso de arrastre difiere grandemente en efectividad entre situaciones de tormentas medias y tropicales. Deben buscarse indicaciones sobre la interacción entre cumuli individuales y circulaciones a escalas medias y grandes en las espectaculares configuraciones de nubes, documentadas primeramente por fotografías aéreas (Kuettner, J., 1959) y reveladas en jerarquía ascendente de escalas por fotografías de satélites. Argumentando con base en el trabajo teórico mencionado, pudimos usar los bellos experimentos de laboratorio de Avsoc (1939) sobre convección laminar para desarrollar criterios sobre incidencia de filas de cumulus paralelas al viento y también configuraciones transversales más complejas. Parece que la deformación de velocidad entre la capa de nubes y sus límites superior e inferior regulan esas orientaciones.

Sin embargo, no solamente pueden identificarse configuraciones de nubes respecto a estructura de viento local sino al mismo tiempo servir como huellas de regímenes atmosféricos y circulaciones sinópticas prevaletes. El régimen de altas subtropicales en celdas (Krueger, A. F. y S. Fritz, 1961) es por ejemplo, muy distinto de la configuración de ondas de alisios (Malkus, J. S. y C. Bonne, 1960) o del huracán en desarrollo (Malkus, J. S. *et al.*, 1961). Quisiéramos saber si tales configuraciones tienen tanto valor diagnóstico como pronóstico.

Para estimar esa posibilidad y desarrollar más los criterios cuantitativos para las configuraciones, resultan definitivamente inadecuadas sólo unas cuantas fotografías más, aún mejoradas, de satélites o aviones. Deben emprenderse programas de investigación específicamente preparados para aviones con instrumentos y estaciones de superficie y relacionar cuantitativamente las fotografías a las condiciones de ambiente y a la frontera. Después volveremos a este punto al terminar una breve discusión de la interacción en el límite del aire.

INTERACCIÓN EN LA FRONTERA DEL AIRE

Aún más que la convección, el tópico de la interacción aire-mar necesita desesperadamente un entendimiento significativo. Al contrario de la convección, no se ha registrado avance fundamental en los últimos veinte años, ya que los métodos empleados por Jacobs (1942) todavía son los mejores para determinar los cambios energéticos vitalmente importantes entre el mar y el aire.

Es verdad que las fórmulas de transporte de Jacobs y el método del equilibrio energético han sido aplicados recientemente por los Rusos (Budyko, M. K., 1956) a una red de datos globales más amplia y probablemente mejor. Debe notarse que desde el Año Geofísico Internacional los mismos Rusos han revisado de manera significativa sus cifras del equilibrio de evaporación y radiación en el océano en sentido

as we shall now suggest in connection with cloud patterning.

While individual cumulus modeling is now running into the stone wall of interaction with both smaller and larger scales of motion, we may postulate that the latter interaction is the crucial one, for example, the entrainment process itself differs widely in effectiveness between fair and tropical storm situations. A clue to the interaction between individual cumuli and meso- and larger-scale circulations is to be sought in the spectacular cloud patterns, first documented by aerial photography (Kuettner, J., 1959) and revealed on an ascending hierarchy of scales by the satellite pictures. Arguing from the theoretical work just discussed, we were able to use beautiful laboratory experiments by Avsoc (1939) on laminar convection to evolve criteria for the occurrence of cumulus rows parallel to the wind, and also for more complex cross-wind patterns. It appears that the velocity shear between the cloud layer and its lower and upper boundaries governs these orientations.

Not only, however, are the cloud patterns identifiably related to the local wind structure but concomitantly they serve as fingerprints of atmospheric regimes and synoptic circulations prevailing. The cellular subtropical high regime (Krueger, A. F. y S. Fritz, 1961) is, for example, quite distinct from the easterly wave pattern (Malkus, J. S. y C. Bonne, 1960) or that of the developing hurricane (Malkus, J. S. *et al.*, 1961). We should like to know whether these patterns have prognostic as well as diagnostic value.

To assess this possibility and develop further the quantitative criteria for the patterns, just more or even improved pictures, satellite or aircraft, are most definitely not adequate. Specifically designed research programs must be undertaken with instrumental aircraft and surface stations to relate the photographs quantitatively to the ambient and boundary conditions. We shall return to this point explicitly after a brief discussion of air-boundary interaction.

AIR-BOUNDARY INTERACTION

Even more than convection, the topic of air-sea interaction is in desperate need of a significant breakthrough. Unlike convection, no fundamental advance has been made in the past twenty years; the methods employed by Jacobs (1942) are still the best we can do in determining the vitally important energy exchanges between sea and air.

It is true that the Jacobs transfer formulas and energy budget method have recently been applied by the Russians (Budyko, M. K., 1956) to a more extensive and probably better global network of data. It is noteworthy that since the International Geophysical Year these same Russians have significantly revised upward their evaporation and oceanic radiation balance figures from those of their 1956

vertical, mejorando su *Atlas del Equilibrio Calórico* de 1956 y cambiando, por consecuencia, las magnitudes de algunos términos de los balances de energía globales (Budyko, M. K. *et al.*, 1962). Así, por ejemplo, han llegado a alterar el transporte de calor derivado residualmente por corrientes marinas, asunto de no pequeña importancia para meteorólogos y oceanógrafos.

Todavía no se aclara si tales nuevas cifras representan de hecho una mejoría de las antiguas o simplemente reflejan la posible variación de error en esas determinaciones. Las últimas seguramente no bajan del 25% de los cambios aire-mar y existen mayores valores en el equilibrio energético planetario, lo que convierte a cualquier análisis de cambios climáticos a largo plazo en especulativo e improbable. La esperanza de remediar tales dificultades parece ahora más inmediata por medio de mejores determinaciones de radiación más que en términos de cualquier avance que parezca importante al tratar la capa de interfase turbulenta tan compleja. Sin embargo, nuestra confianza en la utilidad de las fórmulas de transporte del tipo Jacobs, que hicieron proporcional el cambio al producto de las diferencias de propiedades aire-mar y velocidad del viento, reside en la medición directa del flujo de vapor y calor por aviones con instrumentos (Bunker, A. F., 1960).

Los avances más significativos después de la guerra en la interacción aire-mar han sido en estudios del equilibrio energético en ramas de circulación del aire importantes y en regiones bien documentadas y cuidadosamente seleccionadas. En los trópicos tenemos análisis para los vientos del este en el Pacífico (Riehl, H. *et al.*, 1951, 1957), la zona de la vaguada ecuatorial (Riehl, H. y J. S. Malkus, 1957) y en particular, un extenso estudio del aire-acéano en el Caribe por Colón (1960). Todos dilucidan el papel del cambio aire-mar en dichas porciones de la máquina calórica tropical y muestran cómo el aire usa el agua del mar evaporada y la entrada de calor sensible por el límite inferior para realizar sus cambios energéticos.

La región de los alisios ha sido estudiada como acumuladora de vapor de agua que lleva a sus propios vientos a gastar menos de un cuarta parte de lo almacenado (Riehl, H. *et al.*, 1951), enviando el resto hacia el ecuador donde se eleva y libera por unos cuantos miles de "torres calientes" convectivas mencionadas antes (Riehl, H. *et al.*, 1957). El trabajo de Colón sobre el Caribe comienza examinando cómo operan los canales del flujo de regreso hacia el polo a nivel alto. Estos estudios del balance proporcionan también una prueba independiente y muy satisfactoria de los cambios calculados con las fórmulas de transporte de Jacobs.

A una escala menor de tiempo sabemos que en los trópicos el cambio de calor sensible varía marcadamente en las perturbaciones (Garstang, M., 1958), tanto absoluta como relativamente al cambio de calor latente. Este enriquecimiento debiera alcanzar un extremo global en los huracanes maduros en que Riehl y la autora (Riehl, H. y J. S. Malkus, 1958) lo predijeron, diciendo que el transporte de calor sensible aumentaría por un factor de casi 50 sobre el cambio normal en tanto que la evaporación subiría por un factor de

Atlas of the Heat Balance and have consequently changed the magnitudes of some of the terms in the global energy budgets (Budyko, M. K. *et al.*, 1962). This leads, for example, to altering the residually derived heat transport by sea currents, a matter of no small importance for both meteorologists and oceanographers.

It is still unclear whether these new figures, in fact, represent an improvement upon the old one or merely reflect the likely range of error in such determinations. The latter is surely not less than 25% in the air-sea exchanges and major terms in the planetary energy budget, which renders any analysis of long-term climatic changes both speculative and untestable. Hope of remedying these difficulties now appears more immediate by means of improved radiation determinations rather than in terms of any likely significant advance in treating the highly complex turbulent interface layer. However, direct heat and vapor flux measurements by the instrumented aircraft (Bunker, A. F., 1960) have recently greatly increased our confidence in the usefulness of Jacobs-type transfer formulas, which set exchange proportional to the product of air-sea property difference and windspeed.

The most significant post-war advances in air-sea interaction have been found in energy budget studies of important air circulation branches and carefully chosen well-documented regions. In the tropics, we have such analysis of the Pacific Trade (Riehl, H. *et al.*, 1951, 1957), the equatorial trough zone (Riehl, H. y J. S. Malkus, 1957) and in particular an extensive air-ocean study of the Caribbean by Colón (1960). These elucidate the role of air-sea exchange in in these portions of the tropical heat engine and show how the air uses the evaporated sea water and sensible heat input from the lower boundary in carrying out its energy transactions.

The trade-wind region has been documented as the accumulator of water vapor, which drives its own winds by expenditure of less than a quarter of that picked up (Riehl, H. *et al.*, 1951), shipping the remainder equatorward where it is pumped upward and released by the few thousand convective "hot towers" mentioned earlier (Riehl, H. *et al.*, 1957). Colón's Caribbean work begins to examine how the high-level poleward return flow channels operate. These budget studies further provide an independent and largely satisfactory test of the exchanges computed from the Jacobs transfer formulas.

On the shorter time scale, we've learned that in the tropics, sensible heat exchange jumps markedly is disturbances (Garstang, M., 1958), both absolutely and relative to latent heat exchange. This enhancement should reach a global extreme in the mature hurricane, where and the author predicted (Riehl, H. and J. S. Malkus, 1958) that sensible heat transfer would be increased by a factor of about 50 over the normal trade, while the evaporation would be up by a factor of about 13. We also

casi 13. También sugeríamos el vital papel de tal aumento del cambio para mantener la tormenta. Las relaciones aire-mar en los huracanes serán discutidas ampliamente en esta sesión.

Otra importante, pero apenas explorada faceta del cambio aire-mar tropical es su ciclo diurno y sus relaciones con un pronunciado ciclo acompañante en la nubosidad y precipitación oceánica (Garstang, M., 1958; Lavoie, R. L., 1963). Debido al más rápido calentamiento matutino del aire a nivel inferior en relación con el océano y al más lento enfriamiento del reservorio calórico oceánico en la noche, la diferencia de temperatura aire-mar tropical, aunque sea positiva, tiene una variación diurna que excede 1°F. Observaciones de barcos (Garstang, M., 1958) muestran que alcanza su máximo en la madrugada y que realmente invierte su signo en horas del medio día, pues entre 10 a.m. y 2 p.m. el mar se enfría más que el aire, lo que seguramente detiene el cambio y limita el ascenso de calor y vapor a través de las capas subnubosas.

Intimamente ligados observacionalmente están los ciclos diurnos oceánicos de nubosidad y lluvia, aunque para ellos se necesita mucha documentación. También vale la pena estimar si otros factores como la radiación y/o las mareas atmosféricas son importantes en la producción de tales máximos nocturnos que se han comprobado como reales e importantes. Sin embargo, no ha quedado claro si la convección tropical y la interacción aire-mar están unidas íntimamente y si su acoplamiento es una frontera vital que todavía espera una cuidadosa exploración.

CONCLUSIÓN Y VISTAS AL FUTURO

En estos días de satélites, espacio y calculadoras de alta velocidad, probablemente sea una herejía señalar que el progreso en los formidables problemas señalados ahora —que son realmente la entraña de la meteorología tropical— requieren más observaciones y observaciones en la tropósfera y cerca del límite aire-mar inferior, en especial. No quiero decir solamente observaciones habituales o de rutina en mayor número ni tampoco con equipo, apoyo y talento deseable o abandonado en los programas del espacio.

Lo que se requiere es una serie de programas de observación especial y cuidadosamente concebidos y realizados en circunstancias seleccionadas, donde la naturaleza misma lleva a cabo un experimento semi-controlado sobre la atmósfera tropical.

Se necesita una condición experimental que esperamos modelar teórica o numéricamente o de la cual podamos forjar cuestiones tratables que nos lleven a una aceptable parametrización urgentemente necesaria de la compleja capa limitante y de los procesos turbulentos en nuestros modelos. Sin esta interpretación física no hay caso siquiera de apartarse de otros modelos con ilusorios instrumentos matemáticos o sofisticados esquemas de diferenciación.

Podría concluir citando un ejemplo de tal programa tropical ahora en desarrollo en y cerca de la más exterior isla antillana, la de Barbados (13° 10' N-59° 30' W). Dicho

suggested the vital role of stepped up exchange in storm maintenance. Hurricane air-sea relations will be discussed further at this session.

Another important but barely explored facet of tropical air-sea exchange is its diurnal cycle and the relationship of this to a pronounced accompanying cycle in oceanic cloudiness and precipitation (Garstang, M., 1958; Lavoie, R. L., 1963). Due to faster morning warming of the low-level air relative to the ocean, and a slower cooling of the ocean heat reservoir at night, the tropical air-sea temperature difference, while averaging out positive, has a diurnal range exceeding 1°F. Ship observations (Garstang, M., 1958) show that it reaches a maximum at dawn and actually reverses sign in the midday hours so that between about 10 a.m. and 2 p.m. the sea is actually cooler than the air, which would surely cut off exchange and restrict the upflux of heat and vapor through the subcloud layer.

Closely coupled observationally are the oceanic diurnal cycles of cloudiness and rain, although these need very much more documentation. It is also important to assess whether other factors such as radiation and/or atmospheric tides are important in producing these nocturnal maxima that we now have evidence are both real and important. It is nonetheless clear that tropical convection and air-sea interaction are closely coupled and that their coupling is a vital frontier largely awaiting careful exploration.

CONCLUSION AND FUTURE OUTLOOK

In these days of satellites, space, and high speed computers, it is probably heresy to point out that progress against the formidable problems outlined here —which in fact are at the heart of tropical meteorology— most requires observations, and observations in the troposphere and near the lowly air-sea boundary at that. I do not just mean increased routine or standard observations, nor those with equipment, support, and talent warming up for or left over from the space program.

What is required is a series of specially and carefully conceived observational programs, undertaken under selected circumstances where nature herself is making a semi-controlled experiment upon the tropical atmosphere.

We need an experimental condition which we have some hope of modelling theoretically or numerically, or from which we may frame tractable questions leading to the desperately needed brilliant parameterization of complex boundary layer and turbulent processes in our models. Without this physical insight there is little use merely in bashing away at such models, with fancier mathematical tools or more sophisticated differencing schemes.

Let me conclude by citing an example of such a tropical program now in progress at and near the outermost West Indian island of Barbados (13° 10' N-59° 30' W). This

estudio es un esfuerzo conjunto de muchos individuos e instituciones, demasiado numerosas para mencionarse ahora. Un barco de investigación se estacionará a 250 millas viento arriba de la isla durante Agosto de 1963 y un avión con instrumentos hará un mapa de las nubes, del viento en acción y mediciones de la capa limitante entre el barco y la isla. También efectuará penetraciones individuales a las nubes para comparar la estructura de las nacidas en tierra o en el mar y cuyas diferencias puedan atribuirse a las alteradas condiciones a la frontera y sus consecuencia, que esperamos sean muy específicas.

Barbados es una isla casi ideal para estudios. Es un triángulo alargado de 20 por 15 millas en dimensiones y casi plana por su relativamente simple topografía. Posee una estación de rawinsonda, un radar versátil y una red de estaciones de superficie y pluviómetros muy densa y con larga operación y funcionarios locales y habitantes meteorológicamente conscientes y cooperativos.

El propósito de las observaciones es describir cuantitativamente cómo la isla altera la circulación del aire, la estructura de nubes, su configuración y la precipitación durante el ciclo diurno, tanto en buen tiempo como bajo grado definido de perturbación, en la cual el delicado equilibrio de la atmósfera tropical oceánica se trastorna de manera apreciable con cambios impuestos que puedan medirse en el límite inferior.

Los objetivos a largo plazo de dicha investigación son múltiples abarcando, pero no confinándose, a los siguientes:

- 1) determinar si pueden hacerse y cómo modelos numéricos de la convección inducida por el flujo del aire tropical sobre fuentes calóricas pequeñas y grandes;
- 2) estimar cuantitativamente el "efecto de isla" bajo condiciones no-perturbadas a través de las 24 horas en las estaciones seca y húmeda y como un corolario, determinar los criterios de largas vaguadas de nubes y si pueden considerarse como "barlo ondas";
- 3) determinar cómo distorsiona el "efecto de isla" nuestro concepto de las perturbaciones tropicales oceánicas; cuánto y cómo la isla modifica perturbaciones de fuerza variable e inversamente cómo las perturbaciones modifican el "efecto de isla" de buen tiempo;
- 4) determinar cuán grande debe ser una masa de tierra para invertir el ciclo de nubes diurno oceánico y la precipitación y si Barbados aumenta, disminuye o simplemente redistribuye su propia precipitación pluvial viento arriba respecto a un océano; ¿acaso este aspecto del "efecto de isla" varía entre las estaciones seca y húmeda?
- 5) determinar o delinear estudios para fijar el pronóstico sobre precipitación tropical artificialmente aumentada por una superficie calorígena adicional que pueda ser equivalente a un revestimiento asfáltico

Los resultados preliminares de la prueba de campo en estación seca en Barbados (Abril de 1963) son de interés ya que los objetivos pueden confirmarse por la experiencia

study is a joint effort of many individuals and institutions, too extensive to be listed here. A research vessel will be stationed 250 miles upwind of the island during August 1963, and an instrumental aircraft will map clouds, perform wind and boundary layer measurements between ship and island. It will also make individual cloud penetrations to compare the structure of sea and land-born clouds. The differences should be relatable to the altered boundary conditions and their consequences, which we very much want to specify.

Barbados is a nearly ideal island to study. A lopsided triangle, 20 by 15 miles in dimensions, it is almost flat with relatively simple topography. It possesses a rawinsonde station, a versatile radar, a dense and long-operative rain gauge and surface station network, and meteorologically aware and cooperative local officials and inhabitants.

The purpose of the observations is to describe quantitatively how the island alters the air flow, cloud structure, patterning, and precipitation throughout the diurnal cycle, both in fine weather and under defined degree of disturbance. Hereby the delicate balance of the oceanic tropical atmosphere is upset in a measurable fashion through measurable changes imposed at the lower boundary.

The long-run objectives of this research are manifold. They include but are not confined to the following:

- 1) determining whether and how numerical models can be made of the convection induced by the flow of tropical air over small and larger heat sources;
- 2) assessing quantitatively the "island effect" under undisturbed conditions throughout 24 hours in the wet and dry seasons; as a corollary, to determine the criteria for long cloud streets and whether these can be regarded as "lee waves";
- 3) determining how the "island effect" distorts our view of oceanic tropical disturbances; how much and how does an island modify disturbances of varying strength and conversely how do disturbances modify the fine weather "island effect";
- 4) determining how large a land mass must be to reverse the oceanic diurnal cloud and precipitation cycle and whether Barbados increases, decreases, or merely rearranges its own rainfall relative to that over the upwind ocean; does this aspect of the "island effect" vary between the dry and wet seasons?
- 5) determining, or delineating the questions toward determining, the prognosis of whether tropical precipitation could be artificially enhanced by additional surface heating, such as produced by an asphalt ground coating.

Preliminary results of the Barbados dry season field test, April, 1963) give exciting promise that most of these goals can be realized by the current experiment. The prin-

en curso. Hasta hoy el principal producto del estudio de Abril es una serie de mapas de nubes que se reunirán, si hay tiempo, con distribuciones simultáneas de lluvia y datos de viento y temperatura, fotografías de radar y rutas de globos soltados a cero y rastreados a través de la isla. Esos mismos mapas de nubes muestran alguna evidencia sugestiva e interesante con relación a muchos aspectos del problema que hemos planteado.

Primero, las configuraciones de nubes en la isla y en el océano parecen relacionarse íntimamente y si hay alteraciones menores relativas con su real repetición o aumento. Por ejemplo, las vaguadas de nubes de la isla con cien millas de longitud se observaron cuando también existían en el océano e inversamente. En un día dado la vaguada de la isla tenía extensiones laterales de pocas o muchas nubes similares a las oceánicas y lo creemos, con la misma implicación (Malkus, J. S. *et al.*, 1962). Por supuesto, queda sugerida la excitación de una respuesta natural de la atmósfera que nos ayudaría a comprender y pronosticar mejor la configuración de convección. Prácticamente así podríamos resolver algo de la actual incertidumbre para determinar el campo de viento por fotografías de satélites.

Segundo, la vaguada de nubes de la isla principal tiene casi diariamente la misma ubicación durante horas del medio día, aunque sus "condiciones iniciales" en la temprana mañana y sus tiempos de formación difieran mucho día por día de una manera lógicamente explicable. La principal vaguada de nubes se ubica en una línea definida de convergencia mar-brisa con vientos opuestos casi 180° como cuando cruzaban de norte a sur. Dos conclusiones bien claras se desprenden: a) no hay modelo bi-dimensional que explique ese importante rasgo y b) la principal producción de nubes de la isla es una consecuencia dinámica indirecta del calentamiento más que una consecuencia térmica directa ya que la última podría originarse del flujo calórico en ascenso incrementado o aún del ascenso de alisios sobre la "montaña térmica equivalente".

Tercero, la vaguada de nubes en Barbados aumenta hacia su mayor desarrollo vertical conforme pasa la tarde. Sus nubes persisten y suben todavía en la orilla contraria y muy lejos viento abajo por corto tiempo después del ocaso, mucho antes que hayan desaparecido los cumuli de la isla. La supresión del medio día era frecuente y clara, siguiendo el ciclo oceánico; luego podemos sugerir que Barbados no es bastante grande para invertir el ciclo oceánico, cuando me- nos en la estación seca.

Cuarto, la lluvia con significado agrícola cayó sobre Barbados como cálidos aguaceros de cumulus en débiles perturbaciones, pero su aparente y pronunciado mínimo de medio día deja dudas sobre el efecto total de la isla para aumentar realmente la lluvia oceánica. El análisis de nuestras observaciones adelantará en la solución del punto que tiene muchas implicaciones sobre la modificación artificial de la lluvia. De cualquier manera, una ventaja obvia de una montaña real contra una térmica es su presencia nocturna para aprovechar el máximo desarrollo de cumulus en el océano en la noche.

ciple product to date of the April study is a series of cloud maps, which, when time allows, will be put together with the simultaneous rain distributions wind and temperature data, radar photographs, and paths of zero lift balloons tracked across the island. The cloud maps themselves show some intriguing and suggestive evidence concerning many aspects of the problems we have raised here.

Firstly, the island cloud patterns appeared intimately related to those over the open ocean, and in a real sense repeated or enhanced these with relatively minor alterations. For example, the hundred-mile-long island cloud streets were found on days with good oceanic streets and conversely. On a given day, the island street was many or few clouds in lateral extent similar to those over the sea and with, we believe, the same implication (Malkus, J. S. *et al.*, 1962). This of course suggests the excitation of a natural response of the atmosphere which may help us better understand and predict convection patterns. More practically, it may aid us in resolving some of the present non-uniqueness in determining the wind field from satellite photographs.

Secondly, the main island cloud street was found to occupy nearly the same location daily during the midday hours, though it early morning "starting conditions" and formation times differed widely from day to day in a logically explainable fashion. The main cloud street was found to locate in a sharp line of sea-breeze convergence, with nearly 180° opposed winds as it was crossed from north to south. Two conclusions from this are fairly clear: a) no two-dimensional model will exhibit this important feature and b) the main cloud production of the island is an indirect dynamic consequence of the heating rather than a direct thermal consequence, where the latter would arise from increased upward heat flux or even from lifting the trade winds over the "equivalent thermal mountain".

Thirdly, the Barbados cloud street grew toward its major vertical development as the afternoons were on! Its clouds persisted, still ascending, at the lee shore and far downwind for even a short while after sunset, well before which all over-island cumuli had vanished. Its midday suppression was common and noticeable, following the oceanic cycle; therefore we suggest that Barbados is not large enough to reverse the oceanic cycle, at least in the dry season.

Fourthly, agriculturally significant rain fell onto Barbados from warm cumulus showers in weak disturbances, but the apparent pronounced mid-day minimum in these makes it questionable whether the overall effect of this island is, in fact, enhancing oceanic rain. Analysis of our observations will go far toward settling this point, which has heavy implications relative to artificial rain modification. Anyway, an now obvious advantage of an actual *versus* a thermal mountain is its presence at night to avail itself of the oceanic nocturnal maximum in cumulus development.

Así vemos que resultados de naturaleza práctica y puramente científica pueden desprenderse de tal programa que se preparó casi enteramente con algunas ideas aplicadas en mente. Creemos, para concluir, que el adelanto en los espinosos problemas prácticos que presenta la atmósfera tropical, tales como recursos hídricos inadecuados, hazares de huracanes y pronósticos, deben apoyarse y desarrollarse forzosamente aquellos programas y sus secuelas, junto con otros avances en nuevos equipos de observación e instrumentales como requisito necesario.

AGRADECIMIENTO

Agradezco mucho a todos (ahora fantásticamente numerosos), personas, organizaciones y dependencias que han contribuido al estudio en Barbados. En particular deseo agradecer la misma existencia del programa y cualquier éxito que pueda tener o tenga se debe a mi colega, el Sr. Michael Garstang, su director de campo, quien lleva este importante experimento con tanto tino frente a insuperables dificultades y obstáculos.

Thus we see that results of a practical as well as purely scientific nature can proliferate from such programs, which are designed nearly entirely with basic rather than practical questions in mind. We believe, in conclusion, that to advance the thorny practical problems stemming from the tropical atmosphere, such as inadequate water resources, hurricane hazards, and forecasting, further increased support and manning of such programs and their sequels is mandatory, together with development of the necessary prerequisites of new observational and instrumental tools.

ACKNOWLEDGMENT:

I am deeply grateful to all those (now fantastically numerous) persons, organizations, and agencies who have contributed to the Barbados study. In particular I wish to acknowledge that the very existence of this program and of any successes it may have or will have is owed to my colleague, Mr. Michael Garstang, its field director. He is bringing this demanding experiment off successfully in the face of insuperable difficulties and obstacles.

BIBLIOGRAFIA

- AVSEC, D. 1939. Thermoconvective Eddies in Air: Application to Meteorology. *Sci. and Tech. Publ. of the Air Ministry, Inst. of Fluid Mech., Fac. Sci.* (Paris), No. 155 (en Francés) (in French).
- BERKOFSKY, L. 1960. The Inclusion of Latent Heat of Condensation in a Numerical Forecasting Model. *Cumulus Dynamics*, New York and London (Pergamon Press), pp. 85-102.
- BUDYKO, M. K. 1956. *The Heat Balance of the Earth's Surface*. Gidrometeorologicheskoe izdar'stvo, Leningrad, 255 pp. (Traducido al Inglés por Nina A. Stepanova; traducción distribuida por el U. S. Weather Bureau, Washington, D. C.) (Translated into English by Nina A. Stepanova; translation distributed by the U. S. Weather Bureau, Washington, D. C.)
- BUDYKO, M. K., N. A. EFIMOVA, L. I. ZUBENOK & L. A. STROKINA. 1962. The Heat Balance of the Earth's Surface. *Moscow Akad. Nauk. CCCP, Izv. Ser. Geog. No. 1*, pp. 6-16 (Traducido al Inglés por el Dr. Marwick, Oficina Meteorológica Británica, Bracknell, Inglaterra) (Translated into English by Dr. Marwick, British Meteorology Office, Bracknell, England).
- BUNKER, A. F. 1960. Heat and Water Vapor Fluxes in Air flowing Southward over the Western North Atlantic Ocean. *Jour. Meteorology*, 17, 52-63.
- COLON, J. 1960. On the Heat Balance of the Troposphere and Water Body of the Caribbean Sea. U. S. Weather Bureau, N.H.R.P. Report No. 41, 65 pp.
- CUNNINGHAM, R. M. 1959. Cumulus Circulation. *Recent Advances in Atmospheric Electricity*, London and New York (Pergamon Press), pp. 361-367.
- GARSTANG, M. 1958. Some Meteorological Aspects of the Low-Latitude Tropical Western Atlantic. Results of "Crawford" Cruise No. 15, Ref. No. 58-72, Woods Hole Oceanog. Inst. (Manuscrito inédito) (Unpublished manuscript).
- JACOBS, W. C. 1942. On the Energy Exchange between Sea and Atmosphere. *Jour. Mar. Res.*, 5:37-66.
- KRUEGER, A. F. & S. FRITZ. 1961. Cellular Cloud Patterns Revealed by Tiros I. *Tellus*, 13:1-7.
- KUETTNER, J. 1959. The Band Structure of the Atmosphere. *Tellus*, 11:267-294.

BIBLIOGRAPHY

- LAVOIE, R. L. 1963. Some Aspects of the Meteorology of the Tropical Pacific viewed from an Atoll. Sci. Rep. No. 5, Meteorology Div., Hawaii Inst. of Geophysics, 77 pp. (mimeogr.).
- LEVINE, J. 1959. Spherical Vortex Theory of Bubble-like Motion in Cumulus Clouds. *Jour. Meteorology*, 16:653-662.
- 1963. The Dynamics and Mass Exchange of Positively Buoyant Elements in Cumulus Clouds. (Disertación inédita en I.T.M.) (Unpublished dissertation at M.I.T.).
- LILLY, D. 1962. On the Numerical Simulation of Buoyant Convection. *Tellus*, 14:148-172.
- MALKUS, J. S. 1952. Recent Advances in the Study of Convection Clouds and their Interaction with the Environment. *Tellus*, 4:71-87.
- 1954. Some Results of a Trade Cumulus Investigation. *Jour. Meteorology*, 11:220-237.
- 1956. On the Maintenance of the Trade Winds. *Tellus*, 8:335-350.
- MALKUS, J. S. & C. RONNE. 1960. Cloud Distributions over the Tropical Oceans in Relation to Large-Scale Flow Patterns. *Geophys. Monog. Series, American Geophys. Union, Pub. 746*, Baltimore (Waverly Press), pp. 45-60.
- MALKUS, J. S. & G. WITT. 1959. The Evolution of a Convection Element. A Numerical Calculation. *The Atmosphere and the Sea in Motion*, Rockefeller Institute Oxford University Press, pp. 425-439.
- MALKUS, J. S. & M. RIEHL. 1960. On the Dynamics and Energy Transformations in Steady-State Hurricanes. *Tellus*, 12:1-20.
- MALKUS, J. S., H. RIEHL, C. RONNE & W. M. GRAY. 1961. Cloud Structure and Distributions over the Tropical Pacific. Part II. Ref. No. 61-24, Woods Hole Oceanog. Inst. (Manuscrito inédito) (Unpublished manuscript).
- Cloud Structure and Distributions over the Tropical Pacific. Part III. Ref. No. 62-29, Woods Hole Oceanog. Inst. (Manuscrito inédito) (Unpublished manuscript).
- MALKUS, J. S. & R. T. WILLIAMS. 1963. On the Interaction between Severe Storms and Large Cumulus Clouds (En prensa, *Meteor. Monogr. Series*) (In press, *Meteor. Monogr. Series*).
- MALKUS, J. S., C. RONNE & M. CHAFFEE. 1961. Cloud Patterns in Hurricane Daisy, 1958. *Tellus*, 13:3-30.
- MALKUS, W. V. R. 1954. The Heat Transport and Spectrum of Thermal Turbulence. *Proc. Royal Soc. London*, A225, pp. 196-212.
- OGURA, Y. & N. A. PHILLIPS. 1962. Scale Analysis of Deep and Shallow Convection in the Atmosphere. *Jour. Atmospher. Sci.*, 19:173-179.
- RIEHL, H. 1963. Some Relations between Wind and Thermal Structure of Steady State Hurricanes. (Para publicarse en *Jour. Atmospher. Sci.*) (To be published in *Jour. Atmospher. Sci.*).
- RIEHL, H. & J. S. MALKUS. 1957. On the Heat Balance and Maintenance of Circulation in the Trades. *Quart. Jour. Royal Meteor. Soc.*, 83:21-29.
- 1958. On the Heat Balance in the Equatorial Trough Zone. *Geophysica* (Helsinki), 6(3-4):503-538.
- RIEHL, H., W. M. GRAY, J. S. MALKUS & C. BONNE. 1959. Cloud Structure and Distributions over the Tropical Pacific. Part I. Ref. No. 58-62, Woods Hole Oceanog. Inst. (Manuscrito inédito) (Unpublished manuscript).
- RIEHL, H., T. C. YEH, J. S. MALKUS & N. E. LA SEUR. 1951. The Northcoast trade of the Pacific Ocean. *Quart. Jour. Royal Met. Soc.*, 77:598-626.
- SAUNDERS, P. M. 1962. Penetrative Convection in Stable Stratified Fluids. *Tellus*, 14:177-194.
- SAUNDERS, P. M. & C. RONNE. 1962. A Comparison between the Heights of Cumulus Clouds and the Height of Radar Echoes received from them. *Jour. Applied Met.*, 1:296-302.
- SCORER, R. S. & C. RONNE. 1956. Experiments with Convection Bubbles. *Weather*, 11:151-154.

- STOMMEL, H. 1947. Entrainment of Air into a Cumulus Cloud. *Jour. Meteorology*, 4:91-94.
- TELFORD, J. W. & J. WARNER. 1962. On the Measurement from an Aircraft of Buoyancy and Vertical Air Velocity in Cloud. *Jour. Atmospher. Sci.*, 19:415-423.
- WOODWARD, B. 1959. The Motion in and around Isolated Thermals. *Quart. Jour. Royal Meteor. Soc.*, 85:144-151.
- 1962. Flight Measurement of Isolated Thermals. Final Report under U. S. Army Contract No. DA-91-591-EUC-1707.