

## ALGUNAS INQUIETANTES HIPOTESIS SOBRE EL ORIGEN Y EL ESTADO ACTUAL DE LA LUNA

por el prof. H. C. ÜREY, Premio Nobel de Química  
Catedrático de la Universidad de California

En 1893, G. K. Gilbert, que fue realmente el único que estudió durante el pasado siglo la superficie de la luna con profundo conocimiento de geomorfología, al observar las características de los cráteres lunares, llegó a la conclusión de que eran debidos a grandes colisiones de cuerpos tales como meteoritos contra la superficie lunar. Recientemente, R. B. Baldwin confirmaba la exactitud de esta interpretación, descartando la teoría del origen volcánico de los cráteres lunares, admitiendo no obstante la existencia de pequeños cráteres que no pueden deberse a choques y, por lo tanto deben ser de origen volcánico.

Muchas cuestiones en relación con la luna se han podido resolver definitivamente, considerando su forma general y la naturaleza de uno de sus principales accidentes: la gran colisión imbría.

*Forma de la luna.* Se ha procurado medir las elevaciones existentes en la superficie lunar; pero los métodos de observación son difíciles de aplicar y no muy precisos; así, la prueba más firme de su forma irregular se ha obtenido por el estudio de los movimientos del astro. Esta forma irregular ha de dar como resultado una diferencia de presión en el centro, de unas 20 atmósferas, lo que requiere gran resistencia en el centro de la luna, si la densidad es uniforme en toda ella.

Si no lo es, sino que varía paulatinamente con la latitud y longitud puede explicarse la forma irregular según una teoría moderna. Esta requiere que la densidad cerca de los polos sea mayor que cerca del eje que apunta hacia la tierra. En este caso, la consistencia de la parte profunda no necesita ser muy grande y el centro puede estar a alta temperatura. Sin embargo, esta variación de densidad con la latitud y longitud difícilmente podría haberse conservado, si la masa de la luna se hubiera hallado en estado de fusión en su totalidad en algún momento.

Pero aun en el caso de que la luna tenga densidad uniforme, ¿podría haber estado fundida?

Un objeto de tamaño tan grande como la luna se enfría muy lentamente, incluso en tiempo tan largo como el que tiene de existencia, que estimamos del orden de los 4.500 millones de años, edad que se supone sea la de los meteoritos. Los cálculos de la pérdida de calor prueban que durante todo ese tiempo el centro de la luna habría perdido muy poco calor, y si ésta hubiera estado alguna vez fundida, su centro debería estar todavía muy cerca del punto de fusión y por consiguiente no tendría la consistencia necesaria para soportar la forma irregular.

La presencia de los elementos radiactivos puede aumentar la temperatura en el interior de la luna, pero la extensión de estos efectos depende, naturalmente, de la cantidad y distribución de estos elementos. No conocemos en absoluto su distribución en la luna, e incluso es difícil calcularla en la tierra. Sin embargo, si el calor de la tierra se debe enteramente a la radiactividad, resulta que la cantidad total de esos elementos en la tierra debe ser muy semejante a la de los meteoritos; posiblemente la mitad se encuentren en la corteza. Una distribución parecida mantendría en las zonas profundas de la luna la temperatura por encima del punto de fusión, si hubiera estado originariamente fundida. En efecto, todo el interior, hasta el 0,3 de su radio, debería estar en el punto de fusión, si la temperatura inicial hubiera sido la del punto de fusión de los silicatos. Tal conclusión es incompatible con la forma de la luna; por consiguiente, ha debido formarse a baja temperatura.

Podemos preguntarnos si la luna puede estar actualmente fundida en su interior, por efecto del calentamiento radiactivo, aunque se haya formado a baja temperatura. La respuesta a esta cuestión es incierta.

No conocemos las concentraciones de los elementos radiactivos en la luna, y probablemente la estimación más aproximada nos la pueden dar las concentraciones en los meteoritos, aun cuando no constituyan datos fehacientes. A este respecto, los datos disponibles no pueden conciliarse más que con la hipótesis de que hay una variación de densidad con la latitud y longitud. Esta explicación es compatible con un interior parcialmente fundido en la actualidad, pero no con un estado de fusión total en un remoto pasado.

En 1862, Kelvin escribió un trabajo sobre la solidificación de la tierra a partir de un estado de completa fusión. Entonces no se conocía otra fuente de calor para los procesos volcánicos que el calor residual primitivo y, por consiguiente, supuso para la tierra una alta temperatura original. Esta idea se ha extendido en los libros de texto y generalmente se ha supuesto que todos los cuerpos en el sistema solar estu-

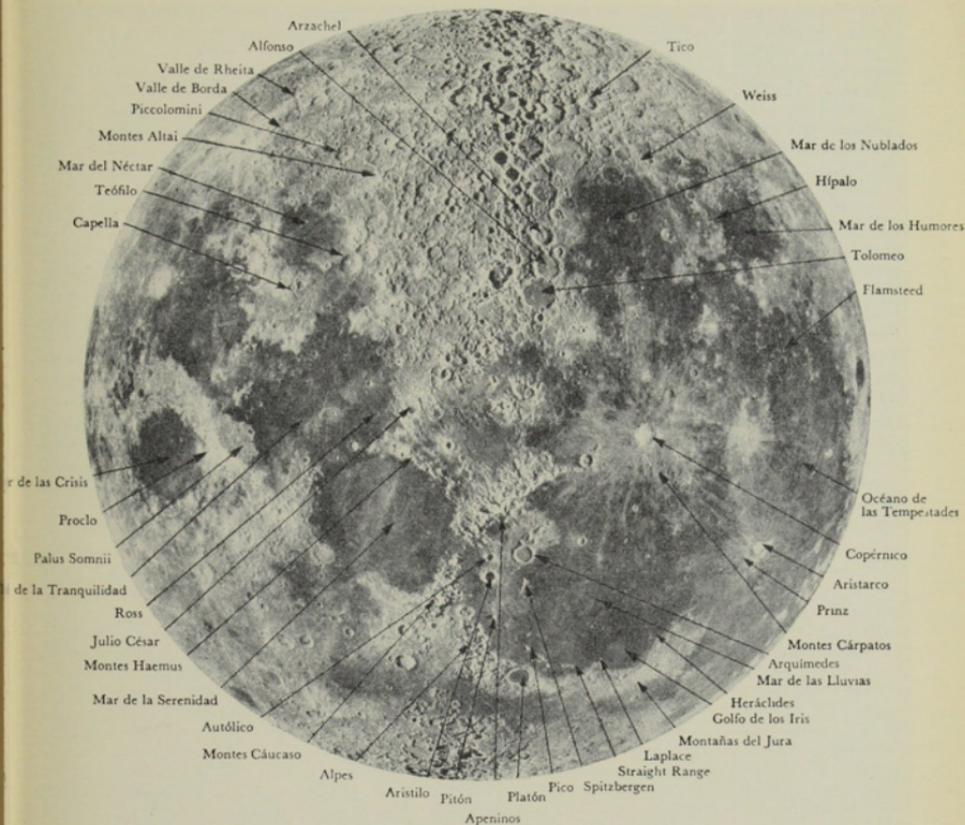


FIGURA 1 - La Luna. En esta fotografía pueden verse las montañas formadas por el material dispersado por la colisión imbría. (Fotografía del Leck Observatory.)

vieron en un principio a muy alta temperatura. El descubrimiento de la radiactividad al comienzo de este siglo hace innecesaria la suposición de Kelvin pero desde entonces no se ha vuelto a estudiar el problema en su conjunto.

**La Colisión Imbría.** En algún momento del remoto pasado se produjo en el *Mare Imbrium* o Mar de las Lluvias, una tremenda colisión, suceso que fue descubierto y descrito por Gilbert. Este choque modificó en gran parte el hemisferio visible de la luna (Fig. 1). Un choque de esta magnitud excede ampliamente toda observación que hayamos podido realizar y, por consiguiente, las deducciones que por extrapolación puedan establecerse a base de observaciones terrestres, han de dar resultados de muy dudosa validez. Es

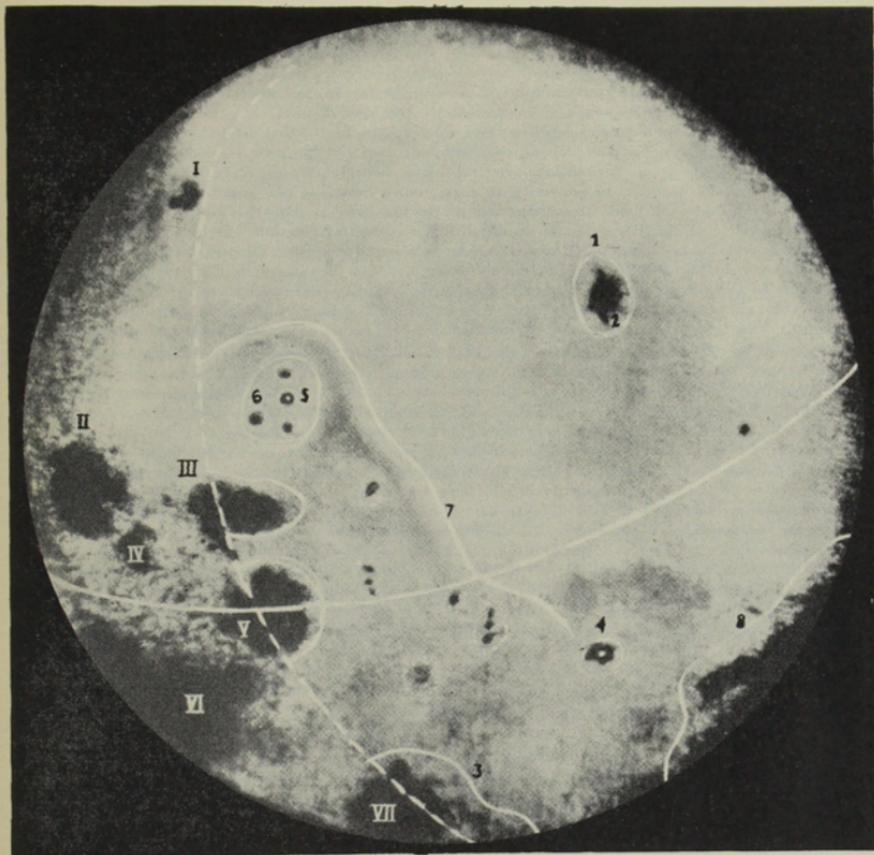
mejor tomar esta colisión como un hecho observado y tratar de obtener de él enseñanza sobre estos grandes choques. El objeto penetró a través del Golfo de los Iris, se aplastó en la región de la colisión y elevó una inmensa ola en todas las direcciones de la superficie lunar; pero especialmente en dirección al centro del disco visible de la luna. La región afectada quedó pulverizada, probablemente hasta el grado de arena fina, y después de la colisión parte del material cayó de nuevo dando lugar a una zona arenosa. Es posible que parte de la superficie lunar fuera lanzada en alto para caer después en grandes bloques formando la Straight Range, Pitón, Pico Spitzbergen y otras masas montañosas, los montes Alpes, Cáucaso, Apeninos y Cárpatos pueden también haber sido producidos por estos materiales; por consiguiente es posible que sean parte del planetésimo que chocó con la luna. En particular, los dos primeros parecen fragmentos de esta clase. Los Montes Haemus deben estar constituidos también por fragmentos del cuerpo percutor. Los surcos que pueden observarse en la superficie afectada por la colisión, deben haber sido producidos por objetos de gran densidad y animados de gran velocidad. La gran densidad de estos materiales hace suponer que se trate de masas metálicas de hierro-níquel, y a pesar de la gran distancia a que se encuentran del área del choque, deben haber formado parte del cuerpo causante de la colisión.

Otros mares circulares son el de las Crisis (Mare Crisium), del Néctar (Nectaris), de los Humores (Humorum) y de la Serenidad (Serenitatis). Al sur y este del Mar del Néctar se ve un escarpe prominente que forma las montañas Altai, semejantes al escarpe que rodea al Mar de las Lluvias. La región entre las montañas y la zona llana del mar está cubierta de grandes cráteres y parece ser análoga a la región arenosa del Mar de las Lluvias. Los valles de Rheita y Borda y otros surcos irradiados de este mar y pueden haber sido producidos por proyectiles a gran velocidad. Baldwin opina que existen surcos radiales alrededor de otros mares. En el Mar de la Serenidad existen cráteres que están parcialmente cubiertos. Probablemente todos estos mares circulares fueron producidos por cuerpos que se aproximaron a la superficie a diferentes ángulos; la gran asimetría del Mar de las Lluvias indica que en este caso el planetésimo se acercó en ángulo agudo. Los otros mares de colisión fueron producidos probablemente por cuerpos que incidieron en una dirección más próxima a la vertical y por lo tanto, no ocasionaron un abanico tan amplio de estrías y surcos.

*Momento de producirse estos fenómenos.* Algunos de los cráteres de la luna deben haber sido producidos por meteoritos, aunque no tenemos pruebas de que hayan caído grandes meteoritos sobre la tierra. Algunos de los grandes cráteres lunares son anteriores y otros posteriores a la gran colisión imbricia. Todas estas colisiones forman parte de una sola serie de fenómenos; se formaron primero algunos cráteres, posteriormente un mar y más tarde nuevos cráteres, y así sucesivamente. Estos cráteres y mares cubrían tan densamente la superficie visible de la luna, que toda ella aparece trastornada. Durante el tiempo de este bombardeo, la tierra debe haber sido bombardeada más intensamente que la luna, en razón de la mayor energía de las colisiones con su superficie, y también porque su campo de gravitación le da una zona más amplia de atracción. Este bombardeo debió destruir todas las rocas sedimentarias terrestres y dejar grandes cicatrices en los escudos continentales. La edad de las rocas terrestres más antiguas ha sido fijada con suficiente precisión en 3.000 millones de años, mientras que los meteoritos datan de 4.500 millones de años o algo más. Así pues el intenso bombardeo de la luna debió producirse hace más de 3.000 millones de años, y puede constituir la fase final de la formación de la luna, de la tierra y probablemente de todo el sistema solar.

*Composición de los mares.* Se ha supuesto comúnmente que los mares estaban formados por lava solidificada y se ha dado por sentado que la lava brotó del interior de la luna. Gilbert, luego de someter a crítica esta teoría, llegó a la conclusión de que la luna estaba fría cuando se formaron los mares y nosotros podemos llegar a la conclusión de que desde entonces ha estado siempre fría en su parte externa. No tenemos pruebas de que las montañas hayan hecho asiento en la superficie lunar, y por lo tanto podemos deducir que las lavas (si realmente lo son) no provienen del interior.

Gilbert creía que la fusión fue producida por la energía de la colisión de los cuerpos que llegaban a la luna. Gold sugirió que los mares estaban formados por gruesas capas de polvo, producido por los efectos erosivos de la luz solar y las partículas radiactivas del sol. Sin embargo, no es admisible esta hipótesis, porque en este caso todas las partes de la superficie lunar ofrecerían el mismo aspecto, cuando menos las regiones ecuatoriales. Esto no es cierto para el hemisferio visible, y según los últimos informes seguramente tampoco para el opuesto. Lo que sí puede existir es alguna erosión de este tipo que modifique los efectos de otros procesos más importantes.



Lado oculto de la luna desde el Lunik III. La línea de puntos indica el borde de la parte visible; todo lo que hay a la derecha de esta línea es invisible desde la Tierra. Las estructuras señaladas en la zona visible son: I Mar de Humboldt, II Mar de las Crisis, III Mar Regional, IV Mar de las Ollas, V Mar de Smith, VI Mar de la Fecundidad, VII Mar Austral; nuevas estructuras visibles: (1) Mar de Moscú, (2) Bahía de los Astronautas, (3) Parte hasta ahora desconocida del Mar Austral, (4) Cráter Tsiolkovsky con su pico central, (5) Cráter Lómonosov, (6) Cráter Joliot-Curie, (7) Cordillera Soviética, (8) Mar de los Sacfos

Diversas observaciones y estudios, conducen a la conclusión de que posiblemente tanto la lava como el polvo, unas veces una y otras veces el otro, se han podido producir debido a las colisiones. Puede haber caído verticalmente un planetésimo y producir el mar de la Serenidad, con un lago de lava muy oscura que fluyó hasta el mar de la Tranquilidad. El contenido de sustancias volátiles debió ser pequeño y su materia se esparció sobre la luna en una zona limitada. Entonces el planetésimo imbrío, con una apreciable concentración de materias volátiles, cayó y distribuyó polvo gris.

Todas las consideraciones expuestas, llevan a la conclusión de que la superficie de la luna fue modelada

principalmente por grandes choques hace 4.500 millones de años, choques ocurridos durante un corto periodo de tiempo del orden de un millón de años; papel relevante tuvo en estos procesos, la gran colisión imbría. Desde entonces, la superficie lunar ha sido bombardeada por cuerpos más pequeños que han producido principalmente cráteres menores.

*El otro hemisferio de la luna.* Los grandes vehículos espaciales de la Unión Soviética nos han dado una fugaz visión del hemisferio hasta ahora desconocido de la luna. Este hecho debe considerarse como la mayor hazaña de exploración desde el descubrimiento de América por Cristóbal Colón. Como en aquel descubrimiento, la información hasta ahora proporcionada por esta primera observación, nos da tan sólo una vaga idea de cómo es el "otro lado", y qué podemos deducir de ello. Hay menos mares que en el hemisferio visible; lo que era inesperado aunque no sorprendente, ya que la colisión imbría ha producido en el lado visible tantas regiones llanas y grises, es decir, la suya propia y probablemente el Océano de las Tempestades, el Mar de las Nubes y otras regiones próximas. Si el planetésimo hubiera caído en el otro lado, el aspecto general de los hemisferios se hubiera invertido por completo; si pudiéramos eliminar los mares de las Lluvias y de la Serenidad, obtendríamos el mismo efecto. El número de cráteres en este lado es tan grande, que se necesita un gran esfuerzo de imaginación para suponer que las grandes regiones de "tierra" del otro lado no estén cubiertas de cráteres semejantes. Pero aunque supusiéramos que en el hemisferio no visible debiera existir el equivalente del mar de las Lluvias, no es sorprendente que no ocurra así.

No es posible, a base de las fotografías transmitidas al Occidente por los técnicos de la Unión Soviética, deducir importantes conclusiones sobre la estructura e historia de la luna. Los mares que existen en el limbo de la luna se extienden por el otro lado, y el Mar de Moscú ocupa aproximadamente el centro del hemisferio invisible. Además hay una indicación de que existe una región lisa próxima, que puede deberse a una colada de lava procedente de la región de una colisión, o a la caída de polvo y bloques producida por ésta. Lo que es evidente es que los efectos erosivos producidos por la luz solar y las partículas radiactivas del sol no han tenido una gran importancia en la configuración de las características de la luna. *Otros accidentes de la superficie lunar.* Hace años que los astrónomos vienen registrando, con considerable detalle, muchos accidentes de la superficie lunar; observaciones más recientes han permitido añadir nuevos detalles. Las estrías radiales procedentes de algunos cráteres atraviesan otras estructuras, tanto de las regiones montañosas como de las deprimidas. Estas líneas se deben sin duda a las partículas disparadas sobre la superficie como resultado de las colisiones explosivas que han dado lugar a los cráteres.

Kozyrev observó en noviembre de 1958 un escape de gases en la región del pico central de Alfonso y publicó el espectro de éstos, haciendo notar que el espectro original muestra la presencia de la raya  $C_{22}$ , que es una característica señalada de los espectros de los cometas. No se ha observado ningún cambio en el aspecto del pico central, de modo que no debe haber sido una erupción volcánica típica como las que se observan en la tierra; es posible que fuera una erupción de agua. Se ha visto en varias partes muchas regiones negras, que con frecuencia tienen pequeños cráteres en el centro. Si el  $C_2$  o más bien los compuestos que la luz solar puede descomponer para dar  $C_2$ , han podido escapar de la luna, debería existir algún ennegrecimiento de la superficie, debido al grafito.

Las superficies de los mares muestran también unos accidentes muy curiosos y enigmáticos, que consisten en unas arrugas grandes y sinuosas de unos 100 metros de alto, varios kilómetros de ancho y cientos de kilómetros de longitud. Kuiper ha observado recientemente que con frecuencia existen grietas a lo largo de sus lomos y que en algunas de ellas puede verse materia blanca. ¿Pudieran ser incrustaciones de sal depositadas por el agua al escapar? También Salisbury ha hecho una interesante sugestión en relación con algunas colinas redondeadas, observadas hace ya muchos años. Supone que el agua ha producido la hidratación del olivino existente en esas regiones y al hincharse éste ha dado lugar a la elevación de la superficie. Probablemente las arrugas de los mares cubren grietas a través de las que sale el agua del interior.

En diversas regiones aparecen largas grietas que en muchos sitios muestran cráteres, cuya curiosa distribución prueba que no se deben a choques, sino que deben haber sido producidos por la salida de gases del interior. Inmediatamente al oeste de Copérnico se ve un notable ejemplo, pero existen otros en la zona de tierra y en las regiones próximas al centro del disco lunar.

Todavía no se ha estudiado bien la causa de la existencia de los grandes valles. El valle Alpino es el más notable entre ellos y tiene unos 130 km. de largo. Se orienta en dirección de la gran colisión del mar de las Lluvias, y se ha venido interpretando como el surco abierto por un cuerpo de hierro-níquel en la superficie. También se ha sugerido que sea una grieta; en realidad es mucho más recto que otros accidentes que generalmente se interpretan como grietas. Los valles de Rheita y Borda en el suroeste son toda-

vía más largos; son muy rectos y si realmente son surcos producidos por el desplazamiento de cuerpos de hierro-níquel, es evidente que estos objetos eran de gran tamaño y se movían a gran velocidad.

*Algunos problemas de la exploración lunar.* La tarea por todos conceptos más inmediata en la exploración lunar es, sin duda, determinar la composición y carácter físico de los mares. Simples observaciones de algunas muestras, mediante métodos que permitieran el estudio de las estructuras cristalinas, darían respuestas inequívocas a algunas de las cuestiones aquí planteadas. Pero tales observaciones no pueden hacerse a la distancia de 384.000 kms. y, aunque se consigan mejores fotografías que permitan descubrir cráteres más pequeños, con ello sólo se obtendrían datos suplementarios no muy importantes. El color de las rocas está determinado por su composición y por la acción de la radiación ultravioleta y de las partículas, actuando en un vacío casi perfecto durante los últimos 4.500 millones de años.

También puede medirse la radiactividad desde naves interplanetarias que vuelen a unos cientos de kilómetros sobre la superficie. Si la radiactividad es parecida a la de la tierra, es prueba de que se ha producido una importante diferenciación de la superficie lunar por procesos de fusión; pero si la concentración de los elementos radiactivos es pequeña, podemos deducir que la composición es similar a la de los meteoritos, y que se ha producido una diferenciación muy pequeña. Lo primero quiere decir que la luna ha tenido en su historia una temperatura muy alta, mientras que lo segundo significa que ha sido baja.

La densidad de la luna es menor que la de la tierra, aun cuando se tenga en cuenta en esta última la compresión debida a sus grandes presiones interiores. Esto significa que la luna o bien tiene menos hierro que la tierra o más sustancias de poca densidad, probablemente agua. Si tiene más agua, ésta debe estar concentrada en las rocas de la superficie como agua de cristalización, y por lo tanto, los porcentajes requeridos serán grandes; probablemente el 10% o más. Esto podría determinarse fácilmente si pudieran hacerse simples análisis químicos. Si la causa de la baja densidad de la luna fuese la falta de hierro, quiere decir que su composición es parecida a la del sol, y que la tierra y otros planetas aumentaron su contenido de hierro durante su formación. Esto nos conduce a dos importantes problemas: el origen de los elementos y el origen del sistema solar.

La rigidez puede determinarse por sismógrafos y gravímetros que se podrían dejar caer sobre la superficie de la luna. Tales medidas dirán si la luna está ahora fundida en sus partes profundas, lo que puede proporcionar mucha información en relación con su temperatura interior.

La determinación por métodos radiactivos de la edad de la superficie de la luna nos permitirá saber definitivamente el momento en que se han producido los fenómenos que se describen en este trabajo. Los materiales de la superficie, particularmente de los polos, que han permanecido fríos durante los tiempos geológicos, nos podrían dar información sobre las intensidades de los rayos cósmicos durante el tiempo que viene existiendo el sistema solar. Para estos estudios es necesario extraer los gases inertes de los materiales de la superficie. Conociendo la rapidez con que son producidos por los rayos cósmicos, podemos calcular el tiempo de exposición, suponiendo que la intensidad de los rayos ha sido constante. Si la edad así calculada está de acuerdo con la obtenida por los métodos radiactivos, podemos decir que los rayos cósmicos han tenido, por término medio, una intensidad constante. Por el contrario, si hay un desacuerdo, será necesario buscar otra explicación.

(Resumido de "Endeavour", abril de 1960)

## CONCLUSIONES DEL CONGRESO NACIONAL DE ZOOLOGIA

En el número anterior del Boletín, dimos cuenta de la celebración del Congreso Nacional de Zoología, organizado por la Asociación de Zoólogos, que contó con la colaboración de la Universidad de Chile y las otras instituciones de enseñanza superior del país. Concurrieron 81 delegados oficiales y 87 miembros asociados a las deliberaciones en las que se conocieron 90 comunicaciones distribuidas en las siguientes secciones en que se dividieron los trabajos: zoología taxonómica, 18 comunica-