

BALANCE ENERGETICO SOLAR Y SU INFLUENCIA GEO-BIO-FISICA

JORGE R. SEIBOLD

Departamento de Física Solar
Observatorio Nacional de Física Cósmica
San Miguel, Argentina

Dentro del horizonte evolutivo del sol se presenta una estimación actual de los diversos almacenamientos de energías térmica y no térmicas, como así también sus correspondientes flujos de energía radiante y de masa, que determinan la estructura de la atmósfera solar como una zona de transición entre el interior del sol en equilibrio quasi-estable y el espacio interplanetario o inter-estelar fuera de equilibrio termodinámico. Se determinan los factores que contribuyen al establecimiento de las Regiones Tranquilas y las Regiones Activas del sol. Se estiman los valores de la energía radiante y de masa del sol tranquilo que afectan y determinan la ionósfera y magnetósfera terrestre como así también los diversos fenómenos vitales de nuestro planeta. Asimismo se estiman los valores de la energía radiante y de masa del sol activo que afectan temporariamente los diversos estratos de nuestra atmósfera terrestre como son las tormentas geomagnéticas, las tormentas ionosféricas, las auroras, SID, etc. Se hacen finalmente algunas consideraciones sobre el aprovechamiento de la energía solar a nivel de la superficie terrestre.

A present estimation of the different thermal and non-thermal energy storages is presented, within the evolute horizon of the Sun, as well as their corresponding radiant energy and mass fluxes that determine the structure of the solar atmosphere as a transition region between the inner part of the Sun in quasi-stable equilibrium and the interplanetary or interstellar space out of thermodynamic equilibrium. The factors that help towards the establishment of the Sun's Active and Quiet Regions are determined. The values of radiant energy and quiet sun mass that effect and determine the Earth's ionosphere and magnetosphere are estimated, as well as the different biological phenomena in our planet. Values of radiant energy and active sun mass that affect temporarily the different layers of our terrestrial atmosphere are estimated (geomagnetic and ionospheric storms, auroras, SID, etc.) Some comments about the use of solar energy at the Earth's surface are finally made.

La interacción Sol-Tierra puede considerarse desde múltiples perspectivas. Es indudable que la información acumulada en los últimos años sobre esta interacción es tan abrumadora que muchas veces oculta lo que debiera aclarar. Es nuestra intención presentar de un modo sintético desde una perspectiva energética la naturaleza cualitativa y cuantitativa de esta interacción dentro de un horizonte evolutivo. Asumimos este horizonte evolutivo como el horizonte de comprensión de dicha interacción, pues no es lo mismo apreciar el balance energético de la proto-estrella, en presencia del sistema de los proto-planetas, que el balance energético del sol como es actualmente con nuestros planetas o que el balance energético del sol cuando pase a la fase de super-gigante con lo que quede del sistema planetario. En la figura 1 presentamos un cuadro de la evolución energética del sol de acuerdo a las teorías clásicas de la evolución estelar. Allí puede observarse las diversas etapas de la evolución, su consiguiente duración y los órdenes de magnitud de las energías entregadas por el sol al espacio inter-estelar o interplanetario. No vamos a describir en detalle estas fases evolutivas, que, por otra parte, pueden encontrarse en la amplia bibliografía actual sobre el tema. Lo que nos interesa recalcar es la necesidad de especificar en cada caso, cuando se habla de balance energético, en qué etapa nos estamos moviendo. El análisis que presentamos en esta comunicación supone que nos encontramos en la etapa actual de nuestro sol. Es decir hacia la mitad de la segunda etapa de la quema del hidrógeno por los procesos de fusión en el centro del astro. Sin embargo, es necesario tener una comprensión de todo el proceso evolutivo del sol para dar razón de los diversos tipos de energías actualmente existentes y de sus correspondientes magnitudes. Hay una inter-relación muy marcada entre Procesos y Tipos de Energía. Así, si consideramos que el sol es producto de un primer proceso de contracción gravitacional producido en nubes de altas densidades y bajas temperaturas, ese mismo proceso producirá energías térmicas y no-térmicas. En general puede decirse que todo proceso produce energía térmica que es función del número de partículas termalizadas por dichos procesos y de la temperatura. La expresión de la energía térmica es $E_T = \int NkT dV$ donde N es la densidad de partículas y dV un elemento de volumen. Las energías no térmicas son producidas por determinados procesos. No todo produce cualquier tipo de energía no térmica. Así, el proceso de contracción está ligado a la energía gravitacional que es la energía adquirida por la masa de la proto-estrella en su concentración desde el infinito $E_G \approx G \cdot \frac{M^2}{R}$. Del mismo modo el proceso de fusión que se produce en el núcleo de la proto-estrella cuando los gases han alcanzado altas temperaturas está ligado a la aparición de otro tipo de energía como es la nuclear totalmente diferente a la gravitacional. El "nacimiento" de esta energía nuclear dada por la "quema" del hidrógeno, no solamente inicia otra etapa evolutiva sino que también marca distintamente la estructura misma del sol. Recién ahora se puede hablar de un "interior" que por naturaleza es opaco y "quasi estable", de una atmósfera como "zona de transición" por naturaleza menos opaca y transparente y de una "exterior" mucho más tenue dada por el espacio inter-estelar o interplanetario fuera de equilibrio termodinámico. Es evidente que desde la aparición de la energía nuclear se inicia una etapa "divergente" del flujo de energía. El flujo de energía se crea ahora preponderantemente en el núcleo del sol y tiende a propagarse hacia el "exterior" donde hay condiciones completamente alejadas de equilibrio. El interior

solar está en equilibrio "quasi-estable" Si estuviera en completo equilibrio termodinámico no habría flujo divergente de energía. La existencia de este flujo hace que se deban postular en función de bases teóricas ciertas zonas del "interior" opaco del sol. Es así como se distinguen la zona nuclear donde se produce fundamentalmente la "querna" del hidrógeno, la zona radiativa donde el flujo de energía producida en el núcleo del sol se hace efectivo por radiación y finalmente la zona convectiva donde las condiciones físicas del interior solar son tales que sólo es permitido al flujo de energía ser transportado por convección. La convección resulta así otro almacenamiento de energía no térmica y está íntimamente ligado, en este caso, al origen nuclear de la energía en el centro del sol y a las condiciones físicas de los gases en la periferia del interior solar. Es evidente que en esta etapa nos estamos moviendo ya en un régimen estable. No entramos para nada en la etapa previa del "transitorio" que lleva a establecer esta energía convectiva a partir de la energía nuclear. No siempre es fácil decidir en cada caso en qué etapa del proceso de la formación de la estrella aparecen las diversas energías no térmicas. Se cree que la energía rotacional está ligada a la primera etapa contraccional del sol e íntimamente ligada a la formación dinámica de los planetas a través de la conservación del impulso angular del sistema (Reeves, H. 1972; Metz, 1974). La energía magnética puede estar ligada a flujos ordenados de plasma en esas mismas etapas primordiales de la formación del proto-sol. Una evaluación de estos diversos almacenamientos de energía y de sus respectivos flujos puede encontrarse en de Jager (1972).

Figura 1

EVOLUCION ENERGETICA SOLAR

Etapas	Duración (años)	Rango de energía emitida ($2 \cdot 10^{33}$ erg s^{-1})
1. Contracción gravitacional	143 millones	Inicialmente 600 Decreciendo rápidamente a .7
2. Quema de Hidrógeno	10.3 billones	Inicialmente .7 Aumentando lentamente a 3
3. Reanudación de la contracción gravitacional del núcleo	500 millones	3 – 10
4. Quema de Helio y Carbono	500 millones	10 – 1000 Con fluctuaciones complicadas
5. Contracción gravitacional final	13 millones	1000 – .01
6. Fase enana blanca	Infinito	.01 enfriándose lentamente hasta 0

De lo dicho anteriormente puede desprenderse la conclusión global de que existe una estrecha correlación entre procesos, diversos tipos de almacenamiento de energías, flujos de energía y estructura del sol. A partir de ciertos estudios recientes (Praderie, 1973; Pecker, Praderie y Thomas, 1973), algunas de estas relaciones han comenzado a clarificarse conceptual y cuantitativamente. Según estos autores, la atmósfera estelar (en nuestro caso la solar) es una zona de transición entre el interior en quasi-equilibrio y el medio inter-estelar fuera de equilibrio termodinámico. En esta zona de transición la energía evoluciona de una configuración de almacenaje de energía térmica y no térmica a una configuración de propagación radiativa y de masa. Es decir que el sol principalmente a través de su atmósfera pierde energía (no se tiene en cuenta en este caso la pérdida de neutrinos en el núcleo del sol). Esta pérdida de energía, medida en ergios por segundo, es lo que denominamos flujo de energía. Este flujo de energía tiene dos expresiones. Uno es el flujo de radiación y otro el flujo de masa. El flujo de radiación está ligado al almacenamiento térmico de la energía. El flujo de masa a los almacenamientos no térmicos de la energía. Desde este punto de vista pueden definirse las diversas zonas de la atmósfera solar en función de los flujos de radiación y de masa respecto a los diversos almacenamientos térmicos y no térmicos. La fotosfera sería la región donde el flujo de radiación evoluciona desde una configuración de almacenamiento térmico a una configuración de propagación. La hilósfera, que comprende a la cromósfera y a la corona, es la región donde el flujo de masa evoluciona desde una configuración de almacenamiento de energías no térmicas a una configuración de propagación. Puede observarse que hablamos de hilósfera (cfr. Pecker, Praderie y Thomas, 1973) o sea la esfera de materia para designar lo que tradicionalmente se denominaba cromósfera y corona. Nótese que etimológicamente esto es más consecuente pues la hilósfera está ligada al flujo de masa, mientras la misma etimología de cromósfera se refiere a color y la de corona a la de forma, conceptos fenomenológicos inhomogéneos y sin sentido físico riguroso. Puede probarse (Praderie, 1973) que las condiciones para la existencia de la cromósfera son la existencia de un flujo de masa (condición necesaria) y la de producirse allí una disipación de energía mecánica (condición suficiente) En este sentido la cromósfera es la zona donde la disipación de energía mecánica comienza a actuar. En la fotosfera existe transporte de energía mecánica (turbulencia, ondas, convección, etc.) pero no propiamente disipación. Puede decirse que la cromósfera es "opaca" al flujo de masa. Predomina en ella la disipación al transporte. Por el contrario, la corona es la parte de la atmósfera donde el término convectivo producido por el flujo de masa es una parte importante del balance energético. De este modo la corona es "transparente" al flujo de masa, que como "viento solar" es expelido normalmente al espacio interplanetario. Sin embargo, la corona no puede disipar toda la energía que le es entregada por las capas inferiores del sol. Su capacidad radiativa es limitada al rango de las emisiones X y ultravioletas de elementos altamente ionizados y que energéticamente son del orden de lo transportado por el viento solar. Debe, por consiguiente, devolver por conducción a la cromósfera ese excedente de energía acumulada a fin de que la cromósfera la disipe radiativamente (Hundhausen, 1973). Pero dentro del balance energético solar y su influencia geo-bio-física no nos podemos circunscribir al sol tranquilo. Es preciso también incluir al sol activo. Este también marca una cierta estructura

que está relacionada a las diversas etapas evolutivas, a los diversos almacenajes de energía, a sus flujos de masa y radiación. Presentamos en la figura 2 un diagrama donde tratamos de sintetizar los principales rasgos del balance energético solar atendiendo significativamente a los **procesos** evolutivos del sol hasta el momento presente, a los **diversos almacenamientos** de energías, a los **flujos de masa y radiación** emergentes, a la **estructura** de la atmósfera solar constituida por la **fotósfera**, la **cromósfera** y la **corona** y los dos modos de ser del sol denominados habitualmente **sol activo** y **sol tranquilo**. Todo ello expresará una interacción específica con el medio interplanetario y en especial con la tierra que será expresada por los diversos efectos que consignan al pie del cuadro.

Siguiendo el diagrama de la Figura N° 2 podemos sintetizar lo expresado anteriormente tanto cualitativa como cuantitativamente. En el triángulo superior está simplificado el proceso de formación del sol. Este proceso a través de sus diversas etapas, produce dos tipos de almacenamientos de energía. La térmica a la izquierda y las no térmicas a la derecha. La energía "madre" de estas últimas es la gravitacional que es del orden de la energía térmica aunque algo mayor. Ligada a la energía gravitacional que queda para esta etapa del sol como almacenamiento potencial, están las energías nuclear, rotacional y magnética que son las energías realmente actuantes en esta etapa evolutiva del sol. De todas ellas la más importante por la fuente de energía que representa es la nuclear, aunque las otras dos, la rotacional y la magnética, junto con la energía convectiva intervienen efectivamente en la constitución del sol activo como puede observarse en la parte derecha del diagrama a través de la constitución de la rotación diferencial y de las regiones activas. La energía convectiva también interviene en la constitución del sol tranquilo sea a través de la granulación y supergranulación ligados a la fotósfera, sea a través del flujo de energía mecánica que se origina como pérdida del almacenamiento de energía convectiva en las capas sub-fotosféricas, y que como tal proporciona la energía suficiente para el calentamiento de la cromósfera y la corona. Comparando los flujos de energía emitidos por la fotósfera, la cromósfera y la corona puede observarse que el flujo emitido por la fotósfera es varios órdenes superior al flujo de la cromósfera y corona integrados. Este flujo fotosférico ($4.6 \cdot 10^{33} \text{ erg s}^{-1}$) es el que va a determinar decisivamente el balance energético terrestre a través de los efectos meteorológicos y los fenómenos vitales de la biósfera, tal como lo detallaremos más adelante en la Figura n. 3. La mayor parte del flujo de energía mecánica es absorbido por la cromósfera ($32 \cdot 10^{28} \text{ erg s}^{-1}$). La corona absorbe solo una pequeña parte ($3 \cdot 10^{28} \text{ erg s}^{-1}$). Pero aunque es una pequeña parte del flujo de energía mecánica no lo puede radiar al espacio debido a que sus condiciones físicas no se lo permiten. Sólo emite radiación y partículas (viento solar) por el orden de $10^{28} \text{ erg s}^{-1}$. El resto, al no poderlo disipar lo "devuelve" por el mecanismo de conducción a la cromósfera, que sí lo puede disipar radiativamente. Este flujo de radiación y de partículas emitidas por la cromósfera y la corona a pesar de ser inferiores al de la fotósfera, es, sin embargo, no sólo de gran importancia en los efectos antes mencionados sino que también determinan la existencia de la ionósfera y magnetósfera terrestre. En grandes líneas estos son los efectos del sol tranquilo. En la parte derecha de la Figura n. 2 se sitúan los principales fenómenos que caracterizan al sol activo y sus efectos correspondientes. Hemos indicado las regiones activas con los correspondientes órdenes de energía de las manchas, las

fáculas y las fulguraciones. Para estas últimas hemos elegido (Kiepenheuer, 1964; Bruzek, 1967) una energía del orden de 10^{32} erg disipada en 10^3 seg., lo que da un flujo de 10^{29} erg s^{-1} . Si asumimos una superficie emisora de 10^{19} cm^2 , tendremos un flujo por unidad de área de 10^{10} erg cm^{-2} s^{-1} . El cual es mucho menor que el flujo fotosférico ($6,4 \cdot 10^{10}$ erg cm^{-2} s^{-1}), que el de las fáculas ($2 \cdot 10^{10}$ erg cm^{-2} s^{-1}) (Wilson, 1971), que el déficit energético de las manchas ($5 \cdot 10^{10}$ erg cm^{-2} s^{-1}) (Kiepenheuer, 1966) y casi del mismo orden del flujo de las manchas (10^{10} erg cm^{-2} s^{-1}). Esto muestra el porqué las fulguraciones son raramente visibles en luz blanca. Si suponemos ahora un volumen emisor de la fulguración del orden de 10^{28} cm^3 , tendremos una densidad de energía emitida de 10^4 erg cm^{-3} . Esta cantidad es varios órdenes mayor que la densidad de energía térmica acumulada en la cromósfera (5 erg cm^{-3}) y en la corona (1 erg cm^{-3}). Incluso es mayor que la energía mecánica acumulada en la cromósfera que es el del orden de 3 erg cm^{-3} (Bruzek, 1967). De aquí que tanto la energía térmica como la energía mecánica sean completamente inadecuadas para dar razón de la aparición repentina de una densidad de energía tan grande como la de la fulguración. El problema del origen de la energía de las fulguraciones todavía está abierto. Algunos han argüido haciendo referencia a la energía contenida en los campos magnéticos ligados a las regiones activas y a su posterior aniquilación (Parker, 1963) o al aprovechamiento del déficit radiactivo de las manchas solares y su almacenamiento en las regiones activas (de Jager, 1969). Volviendo al diagrama de la Figura n. 2 vemos que las fulguraciones emiten tanto radiación como partículas. La mayor parte de la energía de las fulguraciones es llevada por las partículas no relativistas como nube de plasma eyectada de las fulguraciones y que llegan a la tierra entre 20 y 40 horas después de haber partido. La energía llevada por estas partículas no relativistas es del mismo orden de magnitud que la energía implicada en la fulguración tipo, o sea 10^{32} erg. Es interesante comprobar que el flujo de energía de las fulguraciones (10^{29} erg s^{-1}) es muchos órdenes de magnitud menor que el flujo de radiación fotosférico ($4 \cdot 10^{33}$ erg s^{-1}) con lo que se comprueba que las fulguraciones no significan gran cosa desde el punto de vista de su contribución energética a la emisión total del sol. El sol no puede llamarse una estrella "flare" ya que su luminosidad no varía apreciablemente por la incidencia de las fulguraciones en su atmósfera. Sin embargo, las fulguraciones conservan su importancia, no sólo por los intrincados problemas físicos que presentan, sino también por los variados efectos geo-físicos que producen. Son bien conocidos los efectos que la radiación de las fulguraciones en sus frecuencias UV y X produce, como son las perturbaciones repentinas en la ionósfera (SID), o los efectos de base registrados por monitores de neutrones debido a la incidencia de partículas relativistas que llegan a la tierra en menos de una hora, o las tormentas geomagnéticas, las tormentas ionosféricas y las auroras producidas por la llegada de las partículas no relativistas mencionadas arriba.

Para terminar, presentamos en la Figura 3 un diagrama en el que expresamos el balance energético de la Tierra (King Hubbert, 1971). En dicho diagrama puede verse con claridad que son tres los contribuyentes al balance energético terrestre: la energía solar, la energía tidal y la energía nuclear, termal y gravitacional terrestre. Según las estimaciones de King Hubbert (1971) el 99,98 % corresponde a la radiación solar o en otros números la contribución de la

radiación solar a la provisión energética del planeta es 5000 veces lo proporcionado por las otras dos fuentes juntas. Es interesante notar en el diagrama en qué porcentajes se distribuye la radiación solar incidente. Un pequeño, aunque importantísimo, porcentaje está destinado a la fotosíntesis que se desarrolla en la biósfera. Casi todo el resto de la radiación se invierte en lo que nosotros hemos llamado "efectos meteorológicos" en la Figura 2, ya que hay procesos ligados a la reflexión directa, a la conversión en calor y a la posterior emisión en el infrarrojo, a la evaporación del vapor de agua, a la precipitación y a los procesos dinámicos de vientos, ondas, convección y corrientes. Es interesante señalar que la radiación solar captada fuera de nuestra atmósfera es casi constante a lo largo del año. La constante solar, es decir el flujo total de radiación recibida fuera de la atmósfera terrestre por unidad de área a la distancia media sol-tierra, es $1,39 \cdot 10^6$ erg $\text{cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Allen, 1964), con una variación de aproximadamente 2 % debida a la ligera elipticidad de la órbita terrestre (Robinson, 1966). La medida de radiación solar expresada como 100 % en la Figura 3 es la registrada a partir de la constante solar teniendo en cuenta que la Tierra, como un disco, presenta una superficie interceptora del orden del $1,275 \cdot 10^{18}$ cm^2 . Sin embargo, es bien sabido que la radiación que alcanza la superficie de la tierra está limitada por factores astronómicos, geográficos, geométricos, físicos y meteorológicos (Robinson, 1966; Kondratyev, 1969). Estos aspectos inciden en la cantidad de energía solar disponible para su aprovechamiento energético por el hombre. Pero éste ya es un tema específico de gran interés actual con la crisis energética y por lo que nos remitimos también a la abundante bibliografía existente.

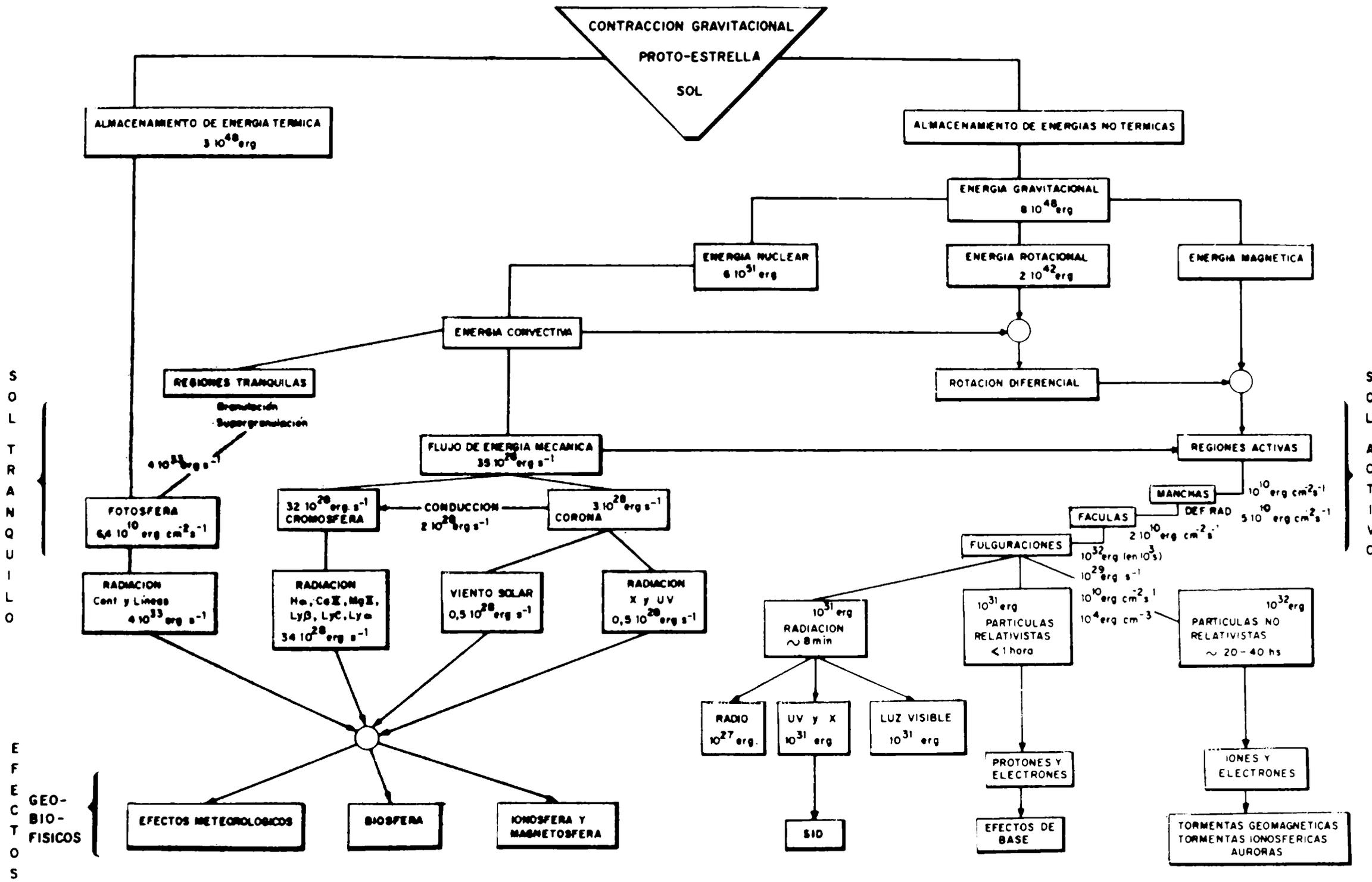


Figura 2

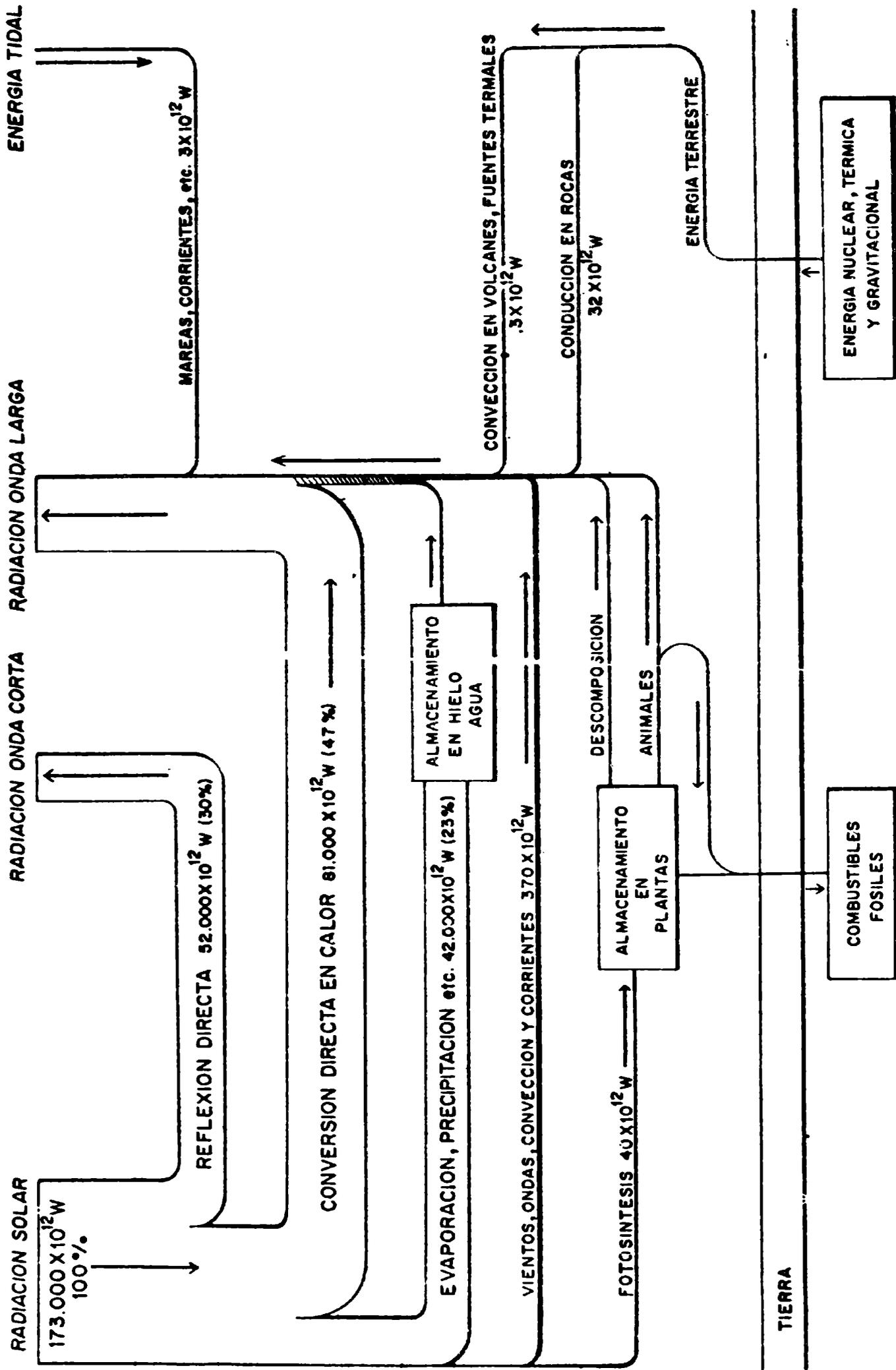


Figura 3

BIBLIOGRAFIA

- ALLEN, C.V., 1964. *Astrophysical Quantities; The Athlone Press, Univ. of London, London.*
- BRUZEK, A., 1967. *Physics of Solar Flares: The Energy and Mass Problem; in Solar Physics, Ed. J.H. Xanthakis, Wiley-Interscience, N. York, pp. 399-421.*
- DE JAGER, C., 1969. *Solar Flares; Properties and Problems; in Solar Flares and Space Research, Eds. C. de Jager y Z. Svestka, North Holland, Amsterdam, p. 1-15.*
- DE JAGER, C., 1972. *Solar Energy Sources; in Solar-Terrestrial Physics/1970, Ed. E.R. Dyer, Part I "The Sun", Ed. C. de Jager, D. Reidel Publ. Co., Dordrecht, Holanda, pp. 1-8.*
- HUNDHAUSEN, A.J. 1973. *Coronal Expansion and Solar Wind; Springer-Verlag, Berlin, Heildelberg, New York.*
- KIEPENHEUER, K.O., 1974. *An Assembly of Flare Observations as Related to Theory; AAS-NASA Symposium on The Physics of Solar Flares, Ed. W.N. Hess, NASA, SP-50, pp. 323-329.*
- KIEPENHEUER, K.O., 1966. *Proceedings of Sunspot Symposium; Ed. G. Barbera, Florence, p. 26.*
- KING HUBBERT, M., 1971: *The Energy Resources of the Earth; Scient. Amer., V. 224, n. 3, pp. 61-70.*
- KONDRATYEV, K. Ya., 1969: *Radiation in the Atmosphere; Academic Press, N.Y.*
- METZ, W.D., 1974: *Exploring the Solar System (II): Models of the Origin, Science, V. 186, pp. 814-818.*
- PARKER, E.N., 1963: *Astrophys. J. Suppl. 8, p. 177.*
- PECKER, J.C., PRADERIE, F. and THOMAS, R.N., 1973: *A Scheme of Stellar Atmospheric Regions; Astron. and Astrophys., V. 29, pp. 289-296.*
- PRADERIE, F., 1973: *Evidence for Stellar Chromospheres Presented by Ground-Based Spectra of the Sun and Stars; in IAU Colloquium n. 19, Stellar Chromospheres, Ed. E.H. Avrett, S.R. Jordan, NASA SP-317, p. 79-97.*
- REEVES, H., 1972: *Symposium of the Origen of the Solar System. Edition of the Centre National de la Recherche Scientifique, Paris.*
- ROBINSON, N., 1966: *Solar Radiation; Elsevier Publ. Co., Amsterdam, Holland.*
- WILSON, P.R., 1971: *Facular Models and the Sunspot Energy Deficit; Solar Phys., V. 21, pp. 101-112.*