

CLIMAS DE BOLIVIA SEGUN EL SISTEMA DE THORNTHWAITE ¹

Por OCTAVIO ANTEZANA PARDO ²

Introducción y antecedentes.— Los diferentes sistemas de clasificación de climas propuestos por distintos autores, en una gran mayoría han tenido la misma base, puesto que han tratado de definir los climas, apoyándose en su aptitud para el desarrollo de la vida vegetal. Su utilización se ha intentado en todas las aplicaciones que precisan de la Climatología; sin embargo, no siempre las actividades del hombre que necesitan de esta ciencia han hecho un uso racional de las mismas. A esto se deben en gran parte las críticas que tales sistemas han merecido.

Prescindiendo de una discusión concreta y particular, y teniendo en cuenta la clasificación de los climas como un problema climatogeográfico general, podemos señalar en una rápida síntesis los principales trabajos representativos de la evolución de este concepto.

Köppen (1884) introduce en la literatura climática el concepto de la precipitación realmente aprovechable por los vegetales, ya que ésta depende principalmente de la temperatura, dado que parte de aquélla se pierde por evaporación. Este autor toma en cuenta la temperatura, la precipitación y la distribución de ambas a través del año, considerando entre sus delimitaciones las grandes formaciones fitogeográficas. Como se ve, toma bases bastante sólidas para clasificar el clima de acuerdo a su aptitud para el desarrollo de la vida vegetal.

¹ Trabajo realizado durante una pasantía de especialización en el Departamento de Agrometeorología del Servicio Meteorológico Nacional de la República Argentina, durante el año 1953.

² Ingeniero Agrónomo, ex Director General del Servicio Meteorológico de Bolivia.

De Martonne (1926 y 1941), para expresar el valor relativo de la precipitación, toma una fórmula que la denomina "Índice de aridez". El sistema de este autor tiene un carácter esencialmente geográfico-físico, y se lo ha aplicado con estos fines.

Thornthwaite (1931) basa su estudio en la clasificación de Köppen, introduciendo nuevas ideas tales como las de precipitación efectiva, eficiencia de la temperatura y su distribución a través del año. Evidentemente éste es un sistema que, sobre todo en el aspecto de la valoración hídrica, se adapta más al real balance hídrico de los suelos que los anteriores. Además, se lo ha aplicado en EE. UU. en trabajos ecológicos y edafológicos.

De lo dicho se infiere que son numerosos los autores que se han dedicado a solucionar el problema en cuestión; pero lamentablemente no disponían de los elementos necesarios. Corresponde pues a Thornthwaite (1948), con su nuevo y práctico sistema de clasificación, dar un paso más hacia el perfeccionamiento de la clasificación de los climas. Este autor introduce en el conocimiento de la climatología moderna nuevos elementos, tales como la evapotranspiración potencial y el balance hídrico de los suelos, y con este último determina el valor relativo de la precipitación.

En esta ponderación utiliza valores experimentales que, si bien no han sido suficientemente generalizados en su experimentación, nos dan una mayor seguridad en los valores obtenidos. El nuevo sistema ha despertado la inquietud de muchos investigadores dedicados al estudio de esta disciplina.

Varios son los autores que han tratado de comprobar la eficacia del método empírico de Thornthwaite (1948) para el cálculo de la evapotranspiración potencial y el balance hídrico, de reciente desarrollo, y con ellos dar una medida de los alcances de su sistema.

En distintos países, a diferentes latitudes, tanto en el hemisferio norte como en el sur, se ha tratado de aplicar el sistema, pero la mayor parte de estos estudios se ha realizado en países de latitudes medias, en los que las observaciones meteorológicas son abundantes. Por otra parte, con distintos métodos y argumentos se ha tratado de demostrar la eficacia del sistema y la exactitud de sus elementos básicos.

Entre los autores que han efectuado tales comprobaciones podemos mencionar a Thornthwaite (1948), quien en diferentes loca-

lidades mostró que los datos de riego o consumo de agua y los obtenidos por el cálculo de la evapotranspiración potencial son comparables. Sanderson (1948), que hizo experiencias en el Canadá para medir la evapotranspiración potencial, comparó los resultados obtenidos con observaciones de los escurrimientos de las cuencas y los obtenidos por el cálculo de la evapotranspiración potencial, y consiguió resultados satisfactorios. Esta misma autora aplicó el nuevo sistema a la clasificación de los climas del Canadá. Gentili (1952), que trabajó con el sistema en Australia, parece no quedar satisfecho con la aplicación del método en la explicación de algunos hechos fitoecológicos, manifestando que probablemente este método no tenga la misma eficacia en países de bajas latitudes. Contreras Arias, en Chapingo (México), utilizó el método en 1948 para realizar observaciones de evapotranspiración artificial, con buenos resultados. Sekiguti (1950), en el Japón, aplicó este concepto y método con el fin de comprobar la validez y efectividad de los elementos que integran el sistema. Así comparó los resultados obtenidos por el cálculo de la evapotranspiración potencial y el balance hídrico, con los daños que ocasionan el tiempo húmedo, la sequía y las frecuentes inundaciones que constituyen verdaderos problemas para el Japón, y halló interesantes analogías.

Sirri Erinc (1949) aplicó este sistema para la clasificación de los climas de Turquía. En años posteriores este mismo autor hizo uso de los elementos que integran el balance hídrico, en el estudio de los tipos climáticos y la variación de las regiones húmedas en Turquía; además relacionó el índice de humedad de los suelos con las áreas cultivadas y el rendimiento del trigo.

Sanderson (1948), al revisar los valores obtenidos por Bernard (1945) de evapotranspiración en el Congo Belga, destaca la analogía con los que pueden obtenerse por el método de cálculo de Thornthwaite.

Burgos y Vidal (1951), en Argentina, aplicaron el sistema a la clasificación de los climas de este país, y, con el propósito de valorar la eficiencia del método, establecieron comparaciones entre los valores de los diferentes elementos que integran el nuevo sistema, con los correspondientes observados de escurrimiento de algunas cuencas, los de consumo de agua para el riego y con la distribución de los diferentes tipos de vegetación natural.

Finalmente citaremos a Melvyn Howe (1953), que hizo uso del sistema en latitudes relativamente bajas, estudiando los climas de Rhodesia y Nyasaland (Africa), comparó los valores de los índices del nuevo sistema con la distribución fitogeográfica que caracteriza a aquella región, llegando a la conclusión de que el nuevo método es aplicable a las regiones tropicales.

Para terminar diremos que Thornthwaite (1951) corrobora la eficacia de su método, analizando los valores de la evapotranspiración potencial calculados y los computados en distintas localidades de bajas latitudes. Discute asimismo este autor la validez de su sistema, realizando estudios comparativos con datos observados en diferentes países de bajas latitudes, entre los que podemos mencionar a Tacubaya (México), Barahona (Rep. Dominicana), Manaos (Brasil), Medellín (Colombia) y otros más; presenta los gráficos de la evapotranspiración potencial y el balance hídrico en su marcha anual; incluye también las cartas climatológicas del Congo Belga y Puerto Rico. El mencionado autor muestra la marcha anual de los distintos elementos que integran su sistema, y destaca la conformidad de sus valores calculados con los datos experimentales u observados que tuvo a su disposición.

En el presente trabajo hemos tratado de aplicar la nueva clasificación de los climas de Thornthwaite a la República de Bolivia, considerando que su ubicación y particulares condiciones de relieve (10° a 22° de latitud sur y 200 a 4.000 m de altura) nos permiten abrir un juicio más sobre la validez de este sistema, para su aplicación en países de bajas latitudes.

Este juicio, a falta de valores experimentales observados con los cuales comparar los calculados, se basa en la consideración de la relación de estos últimos con los tipos de vegetación natural de Bolivia, que se presentan en la figura 1 y fueron bosquejados principalmente siguiendo un esquema facilitado por el Dr. M. Cárdenas.

La evapotranspiración potencial y el balance hídrico, que este elemento permite, son los nuevos conceptos sobre los que se basa el sistema. A continuación estudiaremos cada uno de los elementos que integran el método empírico de Thornthwaite (1948), aplicados al territorio boliviano y la clasificación de sus climas en base a los mismos.

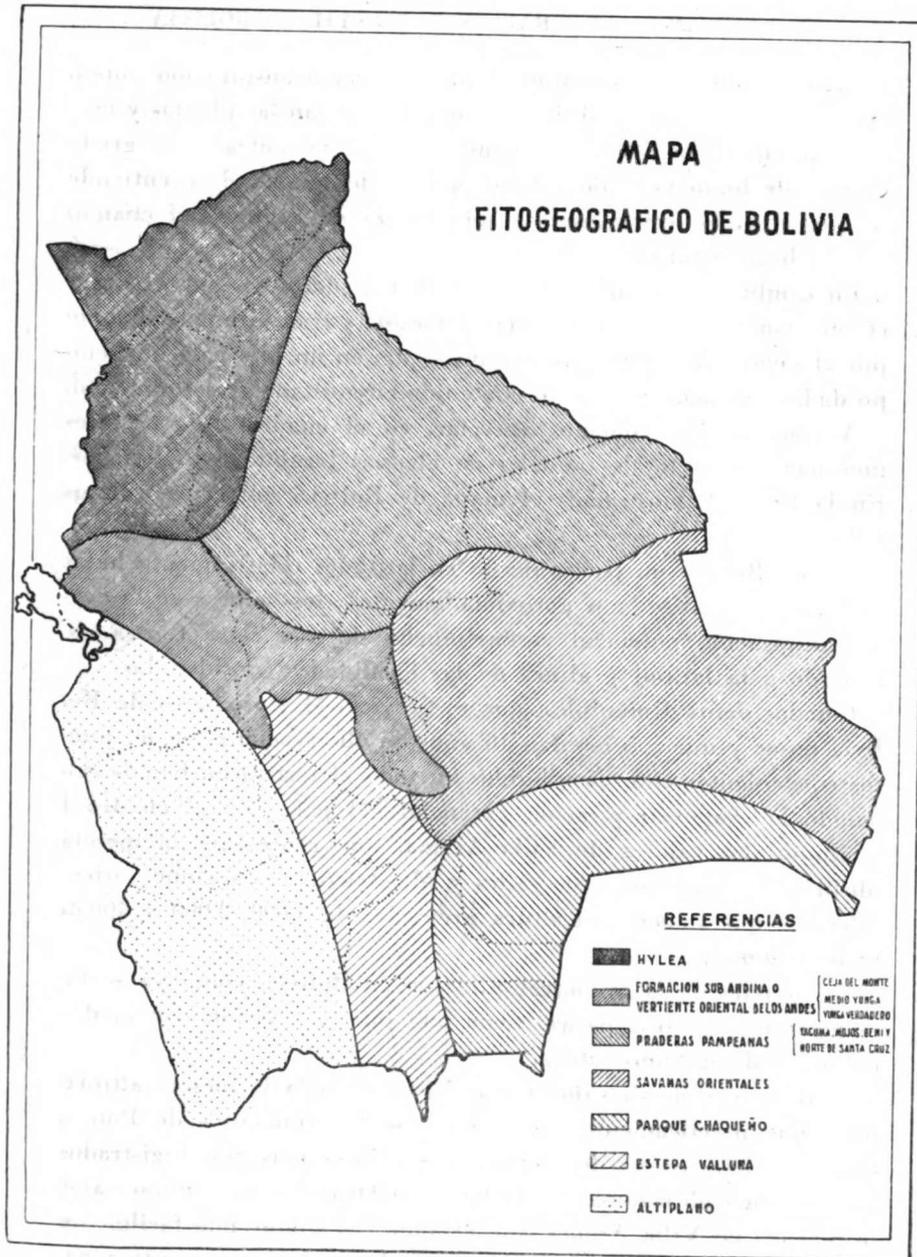


Fig. 1. — Regiones fitogeográficas de Bolivia

I. LA EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL EN BOLIVIA

Según define Thornthwaite (1948), la evapotranspiración potencial es igual a la cantidad de agua que transpiran las plantas y evapora la superficie del suelo, cuando éste se encuentra en el grado óptimo de humedad. Por grado óptimo de humedad se entiende la que el suelo retiene por la sola fuerza de capilaridad cuando éste se halla saturado.

En cambio la evapotranspiración real es definida, por el autor citado, como la cantidad de agua evaporada y transpirada realmente por el suelo y las plantas respectivamente, en un intervalo de tiempo dado y de acuerdo con su contenido circunstancial de humedad.

A continuación podemos apreciar, en el cuadro I, los valores mensuales y los totales anuales de algunas localidades bolivianas. En la figura 2 mostramos el mapa de Bolivia con estos últimos valores.

Siendo Bolivia un país ubicado en latitudes relativamente bajas (10° a 22° de latitud sur aproximadamente), los valores de la evapotranspiración potencial varían mucho de una zona a otra, de acuerdo a la latitud y altura de las localidades consideradas.

Con los datos disponibles, que el Servicio Meteorológico de Bolivia posee y que representan 10 años de observaciones en 50 puntos convenientemente distribuidos en todo el territorio, hemos calculado la evapotranspiración potencial del país. En el cuadro I incluimos los valores de Villa Aroma, que representa la meseta altiplánica; Angostura, los valles y Magdalena, las regiones orientales, las que tienen una altura promedio de 3.600, 2.000 y 400 m respectivamente.

La marcha de la evapotranspiración en Bolivia, como ya se ha demostrado en otros países, tiene una íntima relación con la distribución de la temperatura.

El fenómeno acusa valores muy bajos en toda la meseta altiplánica, que prácticamente comprende los departamentos de Potosí, Oruro y la parte sur de la Paz. Los valores máximos registrados en esta zona alcanzan a los 610 mm en Oruro, y el mínimo valor se registra en Villa Aroma con 506 mm. Se comprende fácilmente que este elemento acuse los valores más bajos del país en esta zona, por la altura a que se encuentra (3.600 m término medio), la influencia de los lagos Titicaca y Poopó y la presencia de los nevados del Sajama, que atenúan la intensidad de la evapotranspiración.

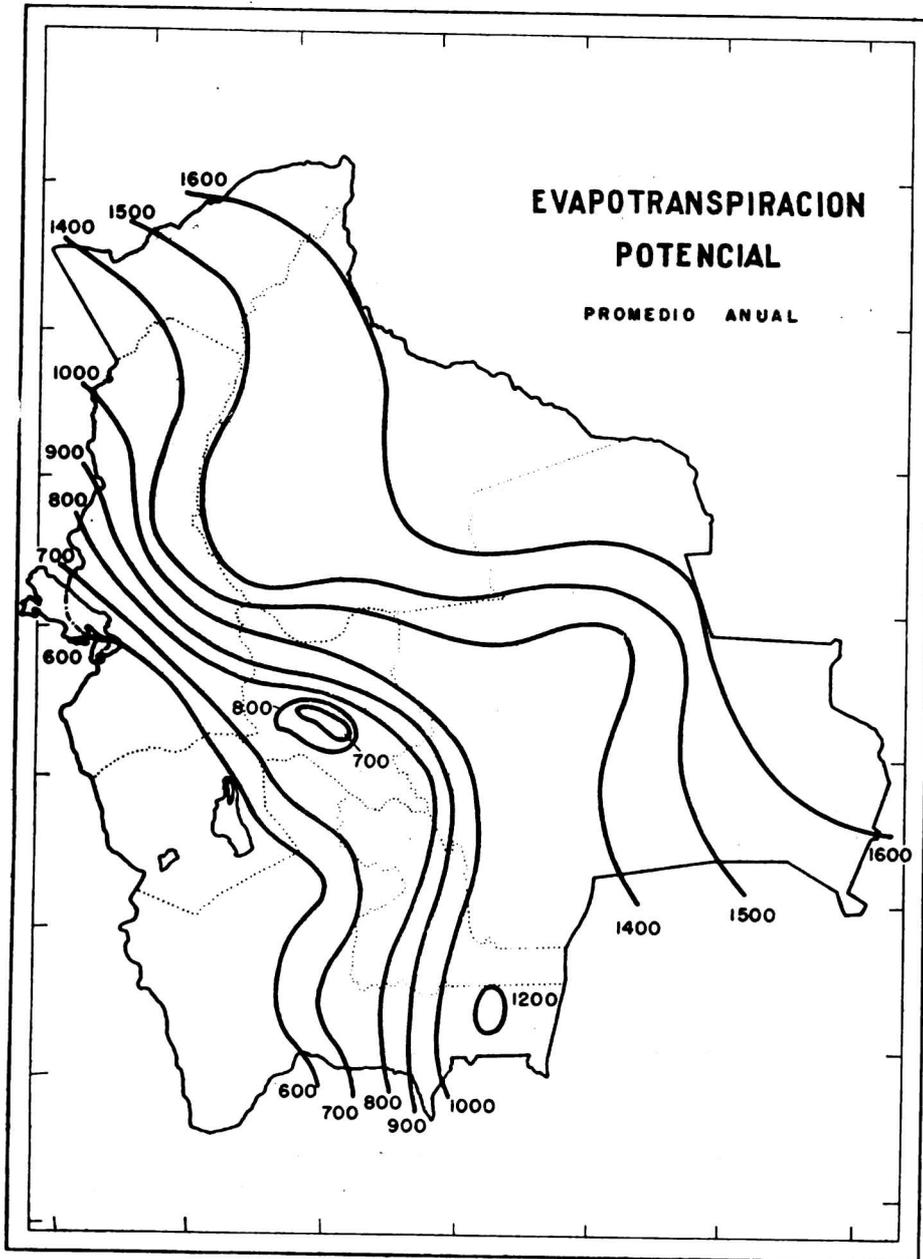


Fig. 2. — Distribución de los valores de evapotranspiración potencial anual en Bolivia

En la zona de los valles mesotérmicos que ocupan la parte central del país, se registran valores más altos que en la zona anterior. Comprende los departamentos de Cochabamba, Sucre y Tarija. Estos valles acusan valores que oscilan entre los 700 y los 1.000 mm, registrándose los más altos valores en los valles del Norte, disminuyendo hacia el Sur con el aumento de la latitud.

La zona de los valles de Yacuma y Moxos, así como los llanos orientales que comprenden la parte sur del Departamento del Beni, el Departamento de Santa Cruz y las provincias de Mizque y Aiquile de Cochabamba, acusan valores que oscilan entre los 1.000 y los 1.400 mm de evapotranspiración potencial.

Finalmente, donde se registran los valores más altos del país es en las zonas que se encuentran ubicadas al Norte, en latitudes más bajas, lo cual explica que el fenómeno se vea activado; nos referimos a las zonas selváticas del Amazonas y la Hylea, que comprende la parte norte del Departamento de La Paz y del Beni, y la totalidad del Departamento de Pando. En ellas encontramos valores superiores a los 1.700 mm, que probablemente en algunas partes de las que no poseemos registro pasen de los 2.000 mm.

II. BALANCE HIDRICO

Disponiendo de los datos de evapotranspiración potencial y precipitación de cualquier localidad, podemos calcular su balance hídrico y apreciar la marcha de la humedad del suelo de la localidad considerada.

En el cuadro II se pueden observar los distintos elementos que integran el balance hídrico, así como los valores mensuales y los totales anuales de estos elementos, en las distintas zonas del país.

Incluimos, además, el cuadro III, en el que se puede apreciar la evapotranspiración potencial, las deficiencias y los excesos de agua en sus valores medios anuales; asimismo se incluye el respectivo tipo climático al que corresponden.

Basándonos en los diferentes datos que aparecen en este cuadro, hemos construido los mapas con las isolíneas de la evapotranspiración potencial y real media anual, como también los de los excesos y deficiencias de agua, los que estimamos preliminares hasta tanto una verificación experimental los ratifique o enmiende (ver figs. 2, 3, 4 y 5).

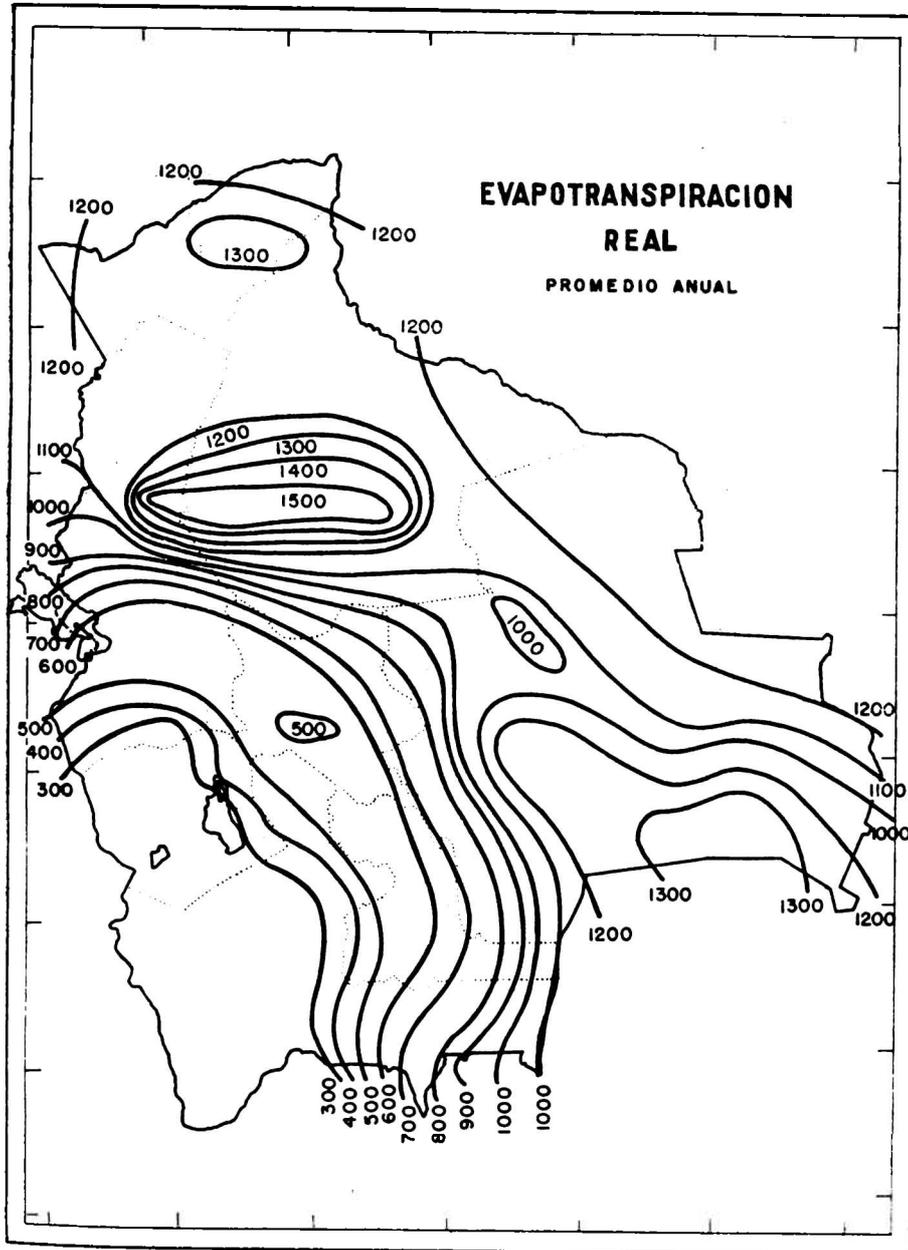


Fig. 3. — Distribución de los valores de evapotranspiración real anual en Bolivia

Las zonas de mayor exceso de agua (fig. 4) se hallan ubicadas al norte y noreste del país, donde nos es posible diferenciar dos formaciones típicas separadas entre sí por la isolínea de los 500 mm de exceso. Al sur de esta isolínea se encuentran las pampas de Yacuma y Mojos, que se hallan cubiertas por curiches, pantanos y lagos, constituyendo la zona anegadiza del país. Estas inmensas pampas, cuya fisonomía es de formación de pradera, se encuentran cubiertas por pastos altos que, de una manera impresionante, hacen horizonte con la vista del observador; en ellas se puede sustentar la crianza ilimitada del ganado vacuno.

La otra zona, localizada al norte de la isolínea antes mencionada, corresponde a la zona de las lluvias ecuatoriales, que exceden de los 2.200 mm y se identifica como formación amazónica selvática o más propiamente Hylea. Esta zona, donde se observan excesos superiores a los 700 mm anuales, comprende la provincia Caupolicán de La Paz, la parte norte del Beni y la totalidad del Departamento Pando; incluye además la inmensa cuenca de los ríos Orton, Madre de Dios, Beni, Mamoré, Itenes, Abuná, etc.

La vertiente oriental de los Andes, que insensiblemente conduce desde la "Ceja de Monte" hasta las pampas de Mojos, presenta tres angostas fajas que se extienden a lo largo de la Cordillera de los Andes, y constituyen otras tantas formaciones vegetales que parecen ser determinadas por las modificaciones del clima general e inducidas por el relieve terrestre; así observamos que la Ceja de Monte desciende desde los 3.200 m hasta los 2.800. Esta zona corresponde a una formación húmeda, de neblina constante, muy diferente a las otras; la segunda formación de la zona subandina es el medio Yunga, que desciende desde los 2.800 hasta los 2.200 m; finalmente tenemos la formación correspondiente al Yunga verdadero, que baja desde los 2.200 m hasta los ríos que ocupan las gargantas cordilleranas. En estas zonas se registran excesos fluctuantes entre los 200 y los 400 mm, originados por los Yungas de La Paz y Cochabamba, y se extienden hacia el sur del país con pequeños y aislados islotes de tipo selvático. Al internarse éstos en Argentina dan origen nuevamente a una formación selvática algo más pobre, que constituye la selva Tucumano Oranense, donde se registran excesos de agua de 200 mm aproximadamente.

La región de las sabanas orientales se encuentra delimitada al Norte por las pampas de Mojos, al Sur por el Parque Chaqueño y

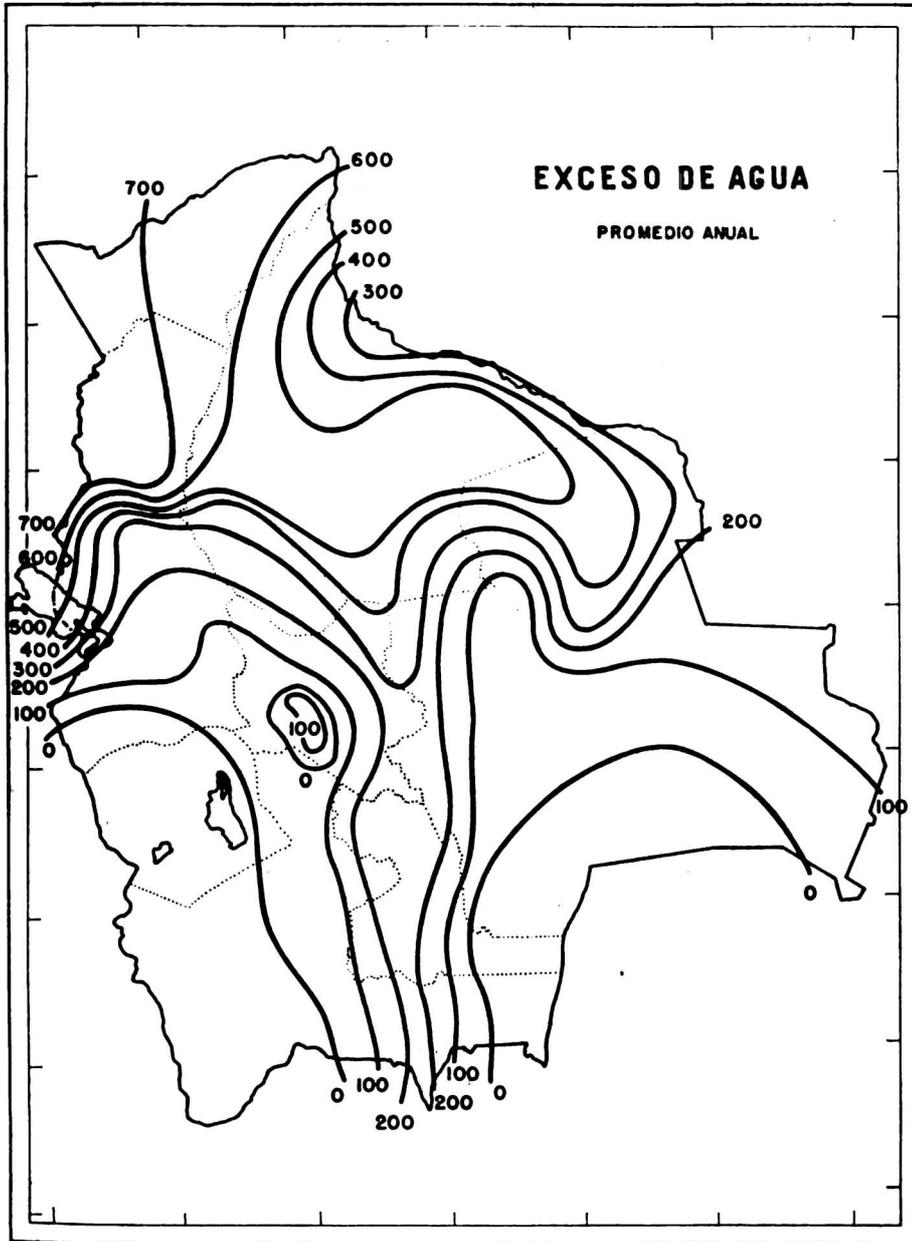


Fig. 4. — Distribución de los valores de exceso de agua anual en Bolivia

al Oeste por la floresta Yungueña. Esta zona acusa excesos de agua que de Sur a Norte van aumentando desde los 100 mm al Sur hasta los 500 mm al Norte, en las proximidades de la zona anterior. Se trata de una formación típica de sabana; comprende la mayor parte del Departamento de Santa Cruz y una pequeña parte (Sur) de Cochabamba.

En las vecindades de San José de Chiquitos y Roboré, se puede todavía identificar la asociación florística llamada "Abayoi", representada por árboles y arbustos diseminados en medio de los pajonales; esta pequeña zona acusa valores inferiores a los del resto de las sabanas.

En la parte central del país, donde aparecen los valles mesotéricos a una altura media de 2.000 m sobre el nivel del mar, se registran moderados excesos de agua que están determinados por la isolínea de los 160 mm de exceso, fluctuando los valores entre los 50 y 150 mm.

Esta zona corresponde a la auténtica formación esteparia; comprende la mayor parte del Departamento de Cochabamba, Chuquisaca y Tarija, incluye además las cuencas de los ríos Grande y Mizque de Cochabamba, los de Pilcomayo, San Juan, Cotagaita, Camblaya, etc., de los Departamentos de Sucre y Tarija.

En Bolivia las zonas que no acusan excesos de agua son relativamente pequeñas. Un ejemplo típico lo constituye el Parque Chaqueño, donde prácticamente el exceso de agua es nulo; abarca las regiones de las serranías de Chiquitos, la provincia Acero de Chuquisaca y la del Gran Chaco de Tarija. Esta formación, ubicada a una altura media de 250 m sobre el nivel del mar, se prolonga hacia el sur del territorio para terminar internándose en Argentina y Paraguay.

En estas zonas observamos, como fisonomía predominante, un bosque bajo, xerófito y espinoso, que se alterna con pajonales y palmares a veces extensos y monoespecíficos.

La escasa vegetación silvestre de esta región, que además se caracteriza por poseer suelos de alta concentración salina, está típicamente representada por la "Tola" (*Lepidophyllum cuadrangulare*) y la "Yareta" (*Azorella glabra*).

Resultará interesante notar aquí la importancia del balance hídrico en la determinación de dos zonas fitogeográficas que acusan

grandes contrastes fisionómicos, no obstante estar delimitadas ambas por la isolínea que marca un exceso de agua nulo, y por una deficiencia de agua que oscila en valores semejantes entre los 300 y 500 mm al año. Tal es el caso del parque chaqueño, que se caracteriza como una formación, en la cual predomina el tipo arbóreo, y el altiplano, cuya formación, típicamente arbustiva, hemos descrito últimamente ¹.

En el altiplano boliviano la evapotranspiración potencial es mínima, debido a las bajas temperaturas estivales y a los fríos invernales. La precipitación anual, con ser bastante baja, no llega a satisfacer las demandas de la evapotranspiración potencial, por lo cual la escasa humedad disponible sólo permite el desarrollo de una vegetación raquílica, del tipo xerófito desértico. La evapotranspiración real en esta región tiene valores inferiores a los 500 mm anuales.

En la región del parque chaqueño, en cambio, la evapotranspiración potencial tiene valores de gran magnitud y la precipitación es mucho más abundante que en el altiplano. Sin embargo, esta última no llega a satisfacer las demandas de aquella, con lo que se origina una deficiencia de magnitud comparable a la que se registra en el altiplano. La baja altura de la región del parque chaqueño y sus condiciones de latitud, originan un régimen térmico que determina una evapotranspiración potencial considerable. Por estas causas, y por las condiciones de relieve, que favorecen más que en el altiplano el escurrimiento por infiltración a las capas profundas del suelo, la humedad disponible de los vegetales es mucho mayor en el parque chaqueño.

Además, se puede observar que en los meses del verano la precipitación excede a la evapotranspiración potencial, por lo que se pierde parte del agua por derrame superficial y por infiltración. Esta humedad, acumulada en el subsuelo, es alcanzada con facilidad por las raíces profundas de la vegetación arbórea, de la que puede servirse en invierno cuando las lluvias disminuyen o en épocas de sequía. Los valores de la evapotranspiración real en este caso oscilan entre los 1.000 y 1.300 mm en el año.

¹ Agradezco al Ing. Agrón. Juan J. Burgos su colaboración en la interpretación de las causas de este contraste.

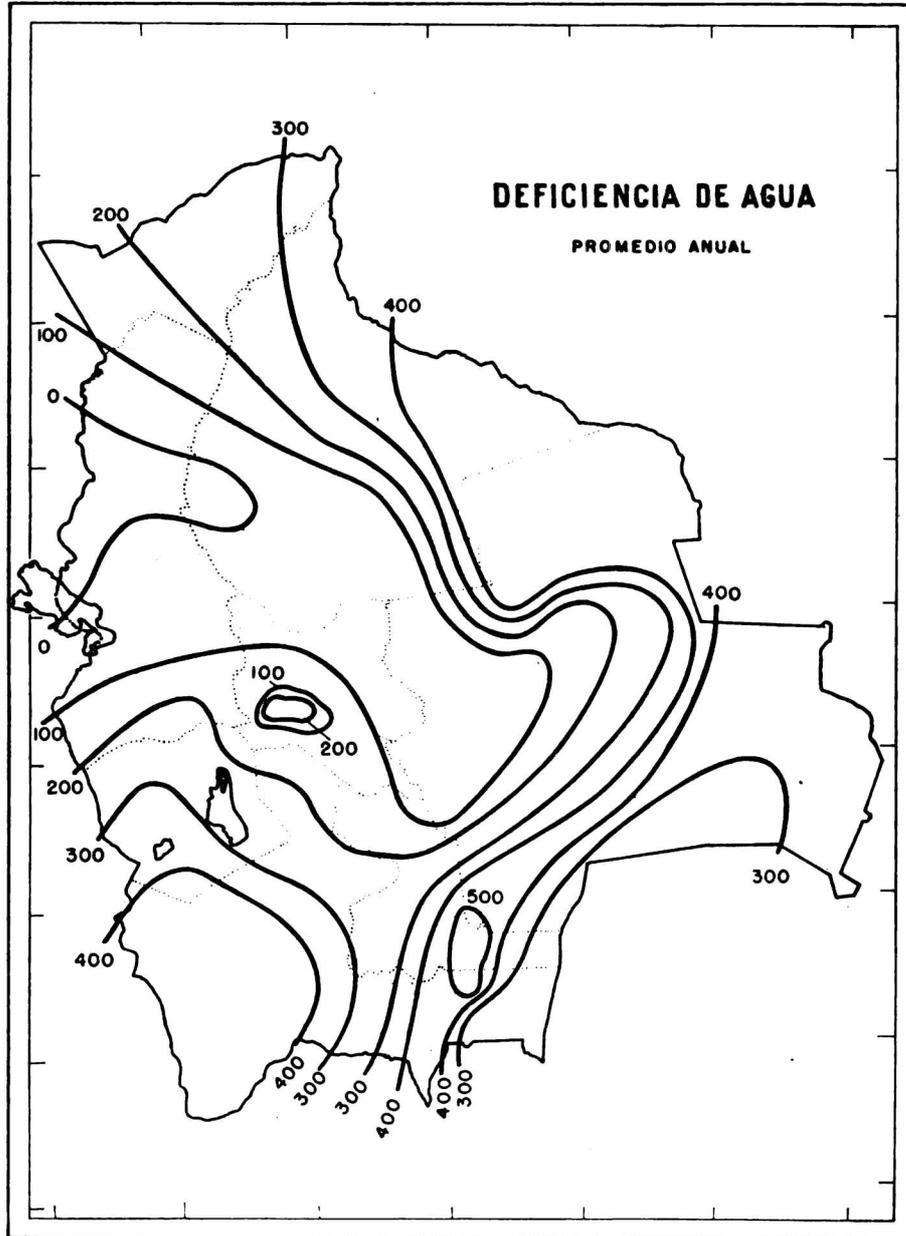


Fig. 5. — Distribución de los valores de deficiencia de agua anual en Bolivia

En la figura 3 incluimos el mapa de la evapotranspiración real que nos da una idea de la magnitud del agua consumida por la vegetación, y que puede servir para la interpretación de las características de las regiones fitogeográficas que hemos analizado. Consideramos que este valor es de utilidad práctica para establecer los límites de la vegetación en las regiones áridas. Así el valor de 500 mm anuales de la evapotranspiración real en estas regiones, limitaría la vegetación xerófila arbustiva de la vegetación xerófila arbórea.

El conocimiento de la distribución y la magnitud de los excesos de agua (figura 4) nos permite indicar las regiones donde la erosión hídrica es o puede ser un problema, y hacia donde pueden converger los esfuerzos para luchar contra ella.

En la figura 5 podemos apreciar que la deficiencia de agua en Bolivia es bastante considerable; sólo regiones muy limitadas se hallan libres de ella como en Apolo, Copacabana, San Borja, Rurrenabaque.

La región de las selvas amazónicas en su parte noreste, que comprende las localidades de Ascensión de Guarayos, Guayamerín, Riberalta, así como los valles intercordilleranos, acusan elevados valores de deficiencia. Las zonas indicadas como centro de aridez máxima incluyen localidades como Uyuni con 467 mm y Villamontes con 510 mm de deficiencia.

El conocimiento de la magnitud y distribución anual de las deficiencias de agua como ser, a nuestro juicio, el índice mejor logrado de la aridez, constituye un auxiliar valioso en la planificación del riego porque nos ilustra con aceptable exactitud sobre la oportunidad y dotación del mismo.

Conviene destacar que el territorio boliviano presenta este carácter de relativamente seco, debido a que las lluvias en la mayor parte del país se concentran en el trimestre más cálido; mientras que el otoño, la primavera y especialmente el invierno, como ya se ha dicho para Argentina, son estaciones de consumo y no de reserva de agua.

En la figura 6 hemos representado el balance hídrico de 9 localidades bolivianas que corresponden a las distintas zonas fitogeográficas referidas anteriormente. En a), b) y c) se representa el balance hídrico de las formaciones selváticas del Amazonas o *Hylea*

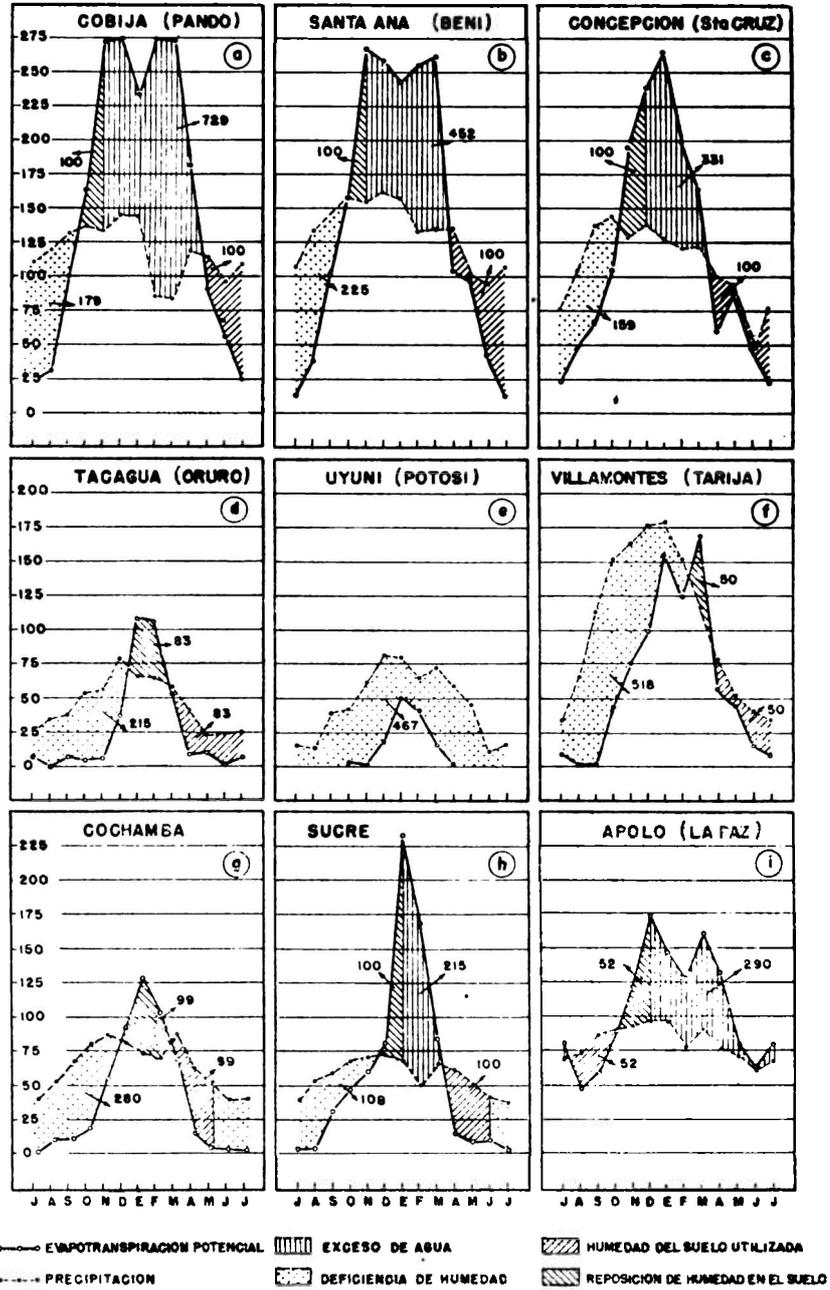


Fig. 6. -- Balance hídrico de algunas localidades bolivianas

más propiamente dicha, las praderas pampeanas y las sabanas orientales, respectivamente. De su examen se deduce que las precipitaciones alcanzan magnitudes considerables en las tres zonas; sin embargo, como las demandas de la evapotranspiración potencial son también altas, vemos que ni la precipitación ni el agua almacenada por el suelo llegan a cubrir sus necesidades en el curso del año. En consecuencia, se observa como saldo un déficit de magnitud variable durante el invierno. Las lluvias se encuentran concentradas en el semestre más caluroso del año, y aunque el otoño es relativamente escaso en precipitaciones, por la humedad acumulada en el suelo no llega a manifestarse con la sequía periódica, característica de invierno y comienzo de primavera.

Los gráficos *d*, *e* y *f* de la figura 6 incluyen ejemplos de los climas áridos. Tacagua es una localidad del altiplano influenciada por el Lago Poopó, que representa una zona de bajos valores de evapotranspiración potencial, no satisfecha por el escaso régimen pluviométrico; acusa un déficit considerable en el semestre más frío del año. Uyuni puede representar el clima netamente árido del altiplano sur; su ínfima precipitación, que no pasa en promedio de 125 mm y que resulta una de las más bajas del país, no llega a cubrir las exiguas demandas de la evapotranspiración potencial, por lo que arroja una deficiencia considerable de agua, distribuida en todo el año. Representa pues la zona de máxima aridez del país. Villamontes constituye un típico ejemplo del clima de los bosques xerófitos del parque chaqueño; en esta localidad la precipitación si bien es abundante no alcanza a satisfacer las exigencias de la evapotranspiración potencial; las lluvias concentradas prácticamente en el trimestre de verano no llegan a fijar en el suelo ni la humedad, que éste es capaz de almacenar, registrándose allí, en consecuencia, el valor de deficiencia más alto del país, de 510 mm.

Finalmente tenemos las localidades de Cochabamba y Sucre, representadas en las figuras 6, *g* y *h*, que caracterizan el clima de las estepas vallunas. En la primera no se registra ningún exceso de agua, pero alcanza a almacenar en el suelo, en la época más lluviosa del año, casi los 100 mm que exige su saturación, los que son utilizados durante el otoño, mientras que se observa una sequía periódica de 280 mm en invierno y primavera. En la segunda localidad de las mencionadas se registra un exceso de 205 mm y una deficiencia de 166 mm.

Para terminar señalaremos que Apolo (La Paz), que ejemplifica climas típicamente húmedos, dentro de sus valores medios normales, no registra deficiencia de agua en el curso del año, a pesar de tener una precipitación que en cantidad es sólo el 50% de las tres primeras localidades representadas. La altura en este caso disminuye notablemente la evapotranspiración potencial, con lo que la precipitación disponible alcanza para saturar el suelo y dar un exceso de 290 mm en el año.

III. REGIONES HIDRICAS DE BOLIVIA

Thorntwaite (1948) ha propuesto como índice para establecer las regiones hídricas un valor, en el que están integrados los elementos del balance hídrico anual antes referido. Este valor se expresa por la fórmula:

$$\frac{100 \times \text{exceso de agua} - 60 \text{ deficiencia de agua}}{\text{necesidad de agua}}$$

Los climas áridos tienen índices hídricos de valor negativo y los húmedos de valor positivo. Los distintos tipos climáticos resultan de los siguientes límites del índice hídrico:

<i>Tipo Climático</i>	<i>Índice Hídrico</i>
A Perhúmedo	100 y superiores
B ₄ Húmedo	80 a 100
B ₃ Húmedo	60 a 80
B ₂ Húmedo	40 a 60
B ₁ Húmedo	20 a 40
C ₂ Subhúmedo húmedo	0 a 20
C ₁ Subhúmedo seco	-20 a 0
D Semiárido	-40 a -20
E Árido	-60 a -40

Como puede verse en la figura nº 7, en Bolivia no existen zonas con clima perhúmedo (A); tampoco se registra el húmedo (B₄), que probablemente puede existir en las zonas anegadizas que hemos mencionado anteriormente, ya que entre las localidades estudiadas algunas se aproximan mucho a este valor. Así, Copacabana, que corresponde al tipo B₃, tiene un índice hídrico igual a 79,9.

La región del lago Titicaca, así como la del noreste del país, que comprende la parte norte de La Paz (provincia de Caupolicán), Rurrenabaque, Cobija, constituyen la parte de la *Hylea* correspondiente al tipo húmedo B₂.

Las praderas pampeanas de Mojos y el Beni; la región oriental del país, Guayaramerín, Riberalta, Concepción, Santa Ana, San Joaquín, etc.; así como la Ceja de Monte y la Asociación Florística yungueña, que comprende los yungas de La Paz y Cochabamba, corresponden al tipo húmedo B₁, cuyos índices hídricos oscilan entre 20 y 36.

Las sabanas del oriente boliviano corresponden al tipo subhúmedo húmedo C₂, y abarcan la mayor parte del departamento de Santa Cruz. La región más oriental de este departamento, así como la parte norte del parque chaqueño, corresponden al tipo subhúmedo seco C₁, mientras que en la parte sur de esta última formación alterna el tipo subhúmedo seco con el semiárido D.

La estepa valluna, que ocupa la parte central del país, y abarca la mayor parte de los departamentos de Cochabamba, Chuquisaca y Tarija, corresponde al tipo subhúmedo seco C₁, pero con algunas localidades como Sucre y Anzaldo de Cochabamba, que alcanzan el nivel de subhúmedo húmedo C₂.

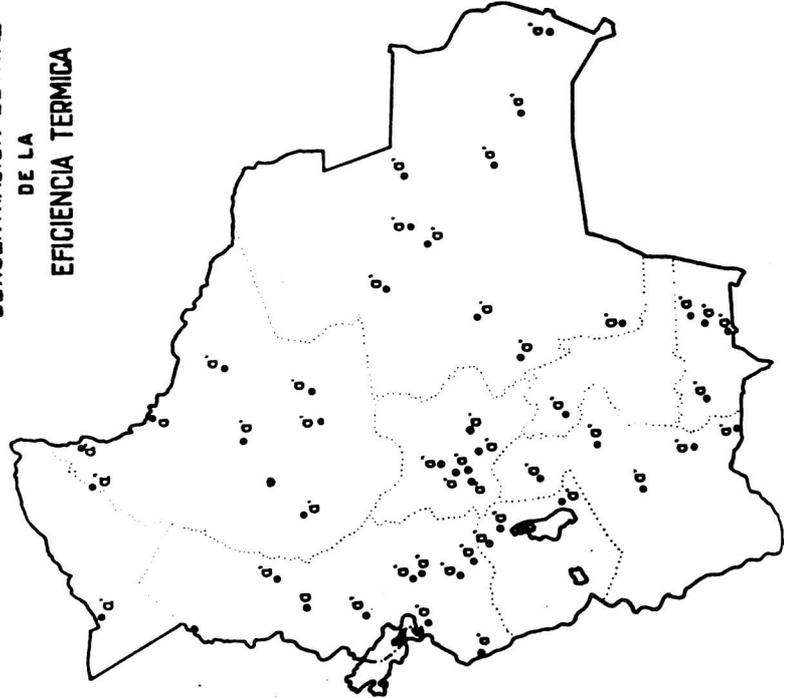
En la meseta altiplánica alternan los tipos climáticos subhúmedo seco C₁ y semiárido D. En las zonas hasta las que alcanza la influencia del lago Titicaca predomina el tipo subhúmedo seco C₁ (Charaña y Viscachani); luego aparece el tipo semiárido D como en Villa Aroma y La Polla, y después en la circunscripción del Lago Poopó reaparece el tipo climático subhúmedo seco C₁ (Pocoata y Oruro). Más al sur, en Tacagua, Potosí, Tupiza, Villazón, etc., predomina nuevamente el tipo semiárido D. El índice hídrico más bajo que hemos encontrado ha sido el de -47, en la localidad de Uyuni que, por lo tanto, corresponde al tipo climático árido E.

IV. VARIACION ESTACIONAL DE LA EFICIENCIA HIDRICA

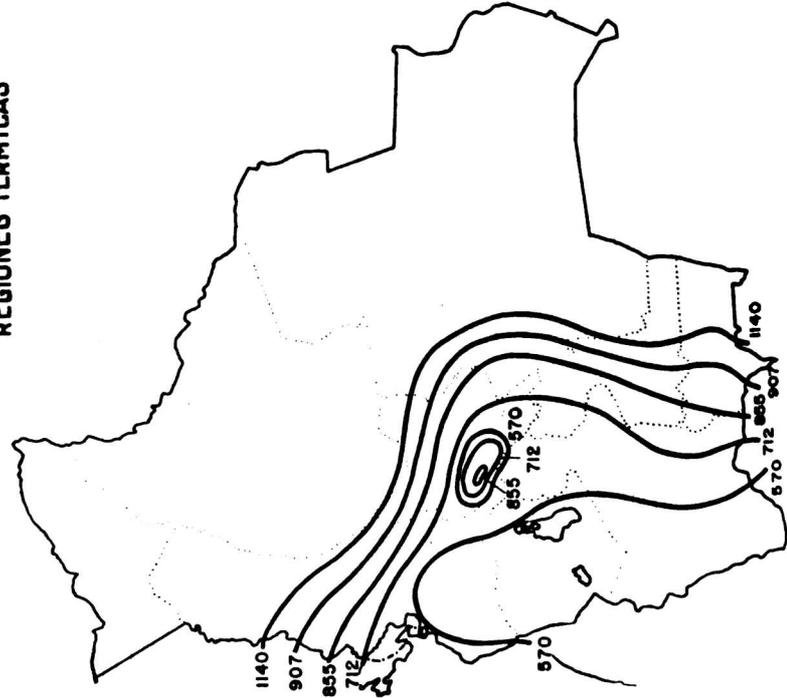
En este nuevo sistema, para expresar la variación estacional de la eficiencia hídrica, se debe tener en cuenta la magnitud del índice de aridez en los climas húmedos (A-B y C₂), y la del índice de humedad en los climas secos (C₁-D y E), de acuerdo a las siguientes características y valores:

4

CONCENTRACION ESTIVAL
DE LA
EFICIENCIA TERMICA



REGIONES TERMICAS



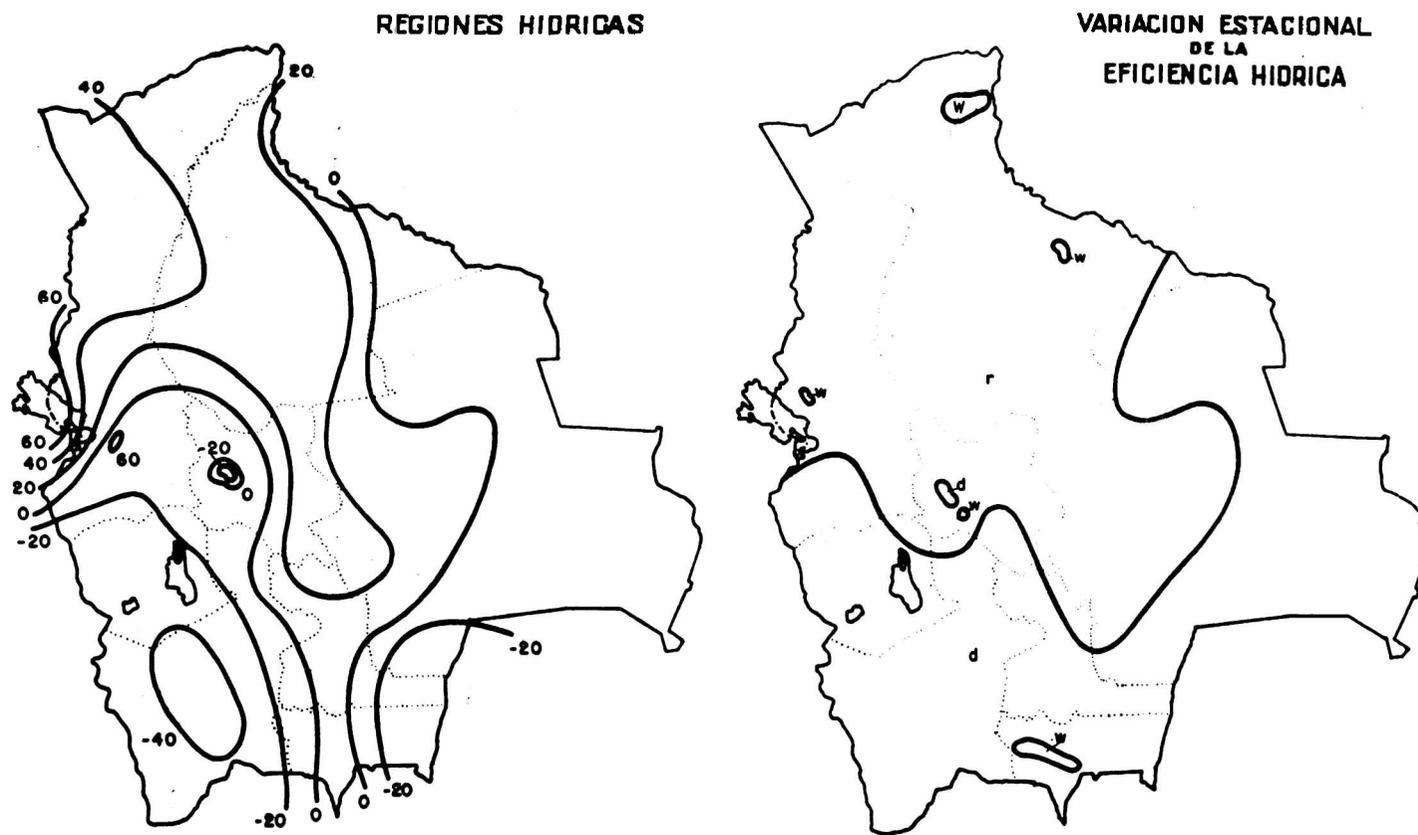


Fig. 7. — Regiones climáticas de Bolivia, según el sistema de Thornthwaite (1948)

<i>Climas húmedos (A-B-C_u)</i>	<i>Índice de aridez</i>
<i>r.</i> Nula o pequeña deficiencia de agua	0 a 10
<i>s.</i> Deficiencia moderada de agua en verano	16,7 a 33,3
<i>w.</i> Deficiencia moderada de agua en invierno	16,7 a 33,3
<i>s_v</i> Gran deficiencia de agua en verano	más de 33,3
<i>w_v</i> Gran deficiencia de agua en invierno	más de 33,3

<i>Climas secos (C_v-D-E)</i>	<i>Índice de humedad</i>
<i>d.</i> Nulo o pequeño exceso de agua	0 a 10
<i>s.</i> Exceso moderado de agua en invierno	10 a 20
<i>w.</i> Exceso moderado de agua en verano	10 a 20
<i>s_v</i> Gran exceso de agua en invierno	más de 20
<i>w_v</i> Gran exceso de agua en verano	más de 20

Observando la figura que representa la variación estacional de la eficiencia hídrica, deducimos que en Bolivia los climas húmedos localizados en las inmediaciones del lago Titicaca (Copacabana, Guaqui, etc.), extendiéndose por el norte, sur y oeste del país, englobando los departamentos del Beni y Pando en su totalidad, parte de los valles de Cochabamba (región del Chapare, Ynguas de San Antonio, Todosantos, etc.), algo de Sucre y la parte central de Santa Cruz, presentan la característica de nula o pequeña deficiencia de agua. En cambio, la variación estacional de la eficiencia hídrica en las zonas de Guayaramerín, Riberalta, Magdalena, una pequeña zona de Cochabamba, Sorata de La Paz, Sucre, Yacuiba y Tarija, toma la característica *w.* o de deficiencia moderada de agua en invierno. Cabe destacar, sin embargo, que para el caso de Tarija, este signo *w.* indica exceso moderado de agua en verano.

Los climas secos, ubicados con preferencia en la parte sur del Altiplano: Potosí, Oruro y parte sur de La Paz; una parte de los valles mesotérmicos y en la región oriental; la parte norte, sur y oeste de Santa Cruz, presentan la característica de nulo o pequeño exceso de agua.

V. REGIONES TÉRMICAS DE BOLIVIA

Como la evapotranspiración potencial se calcula en función de la longitud del día y de la temperatura, se ha propuesto este valor en la nueva clasificación que nos ocupa como índice de la eficiencia

térmica. Los tipos climáticos térmicos y los índices límites de los mismos son los siguientes:

Índice de eficiencia térmica mm	Tipo de clima	
142	E'	Helado
285	D'	Tundra
427	C' ₁	Microtermal
570	C' ₂	
712	B' ₁	Mesotermal
855	B' ₂	
907	B' ₃	
1.140	B' ₄	
	A'	Megatermal

Dentro del territorio boliviano se pueden distinguir tres zonas claramente diferenciadas (fig. 7), en lo que respecta al régimen térmico.

El clima megatermal A' abarca una vasta zona del territorio, englobando las zonas de la Hylea, los llanos de Yacuma y Mojos, parte norte de La Paz (provincia Caupolicán), algo de Santa Cruz, las localidades de Velazco, Ichilo, Concepción, San José, Valle Grande, Puerto Suárez, etc. En esta zona prácticamente no se registran heladas, por lo que prosperan cultivos tropicales a los que daña esta adversidad climática.

Los climas mesotermal se hallan concentrados, en su mayor parte, en los valles intercordilleranos con los siguientes tipos:

Las zonas de Apolo, San Javier, Sanandita y Valle Grande, corresponden al tipo B'₄; B'₃, en la zona de Parotani (Cochabamba); B'₂ en una parte de Tarija, gran parte de los valles de Cochabamba y Sucre; B'₁ en una pequeña zona de La Paz y en las localidades de Charaña, Oruro, Potosí, Uyuni, Villazón y Pocoata. El tipo climático microtermal se circunscribe a la región altiplánica y comprende las zonas de Viscachani, Guaqui, Villa Aroma, Tacagua, etc., que corresponden al tipo C'₂; probablemente los tipos C'₁, D' tundra y E' helado, se encuentren escalonados en los nevados del Sajama, Chacaltaya, cumbres del Illimani, Illampu y otros picos que eternamente aparecen cubiertos de nieve.

VI. CONCENTRACION ESTIVAL DE LA EFICIENCIA TERMICA

La concentración estival de la eficiencia térmica abarca los siguientes tipos y sus correspondientes porcentajes de concentración:

Concentración estival %.	Concentración estival tipo
48,0	a'
51,9	b' ₄
56,3	b' ₃
61,6	b' ₂
68,0	b' ₁
76,3	c' ₄
88,0	c' ₃
	d'

Dentro del país (fig. 7), como en otros países sudamericanos, se registra muy poca variación anual de temperatura, particularidad climática que hace que en Bolivia la concentración estival de la eficiencia térmica corresponda al tipo a', únicamente variando su porcentaje desde un 27 a un 40 %.

Sumario. — Se estudian los tipos climáticos de Bolivia según el método de Thornthwaite de 1948. Se encuentra un ajuste adecuado con los tipos de vegetación natural de bajas latitudes.

Summary. — The climatic types of Bolivia are studied according to Thornthwaite's 1948 method. A suitable adjustment with the natural vegetation types of low latitudes is then found.

CUADRO I. — Evapotranspiración potencial de tres localidades bolivianas

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Annual
VILLA AROMA													
Temperatura °C.....	8,4	8,2	8,7	5,9	4,0	2,7	1,9	3,1	6,5	6,4	7,0	7,3	6,4
I.....	2,18	2,12	2,31	1,29	0,71	0,39	0,23	0,48	1,49	1,45	1,16	1,72	16,03
Evapotransp. potencial no ajustada.	56	55	57	42	31	23	18	26	45	45	48	52	
Evapotransp. potencial ajustada...	63	54	59	40	30	21	16	21	45	48	51	58	506
ANGOSTURA													
Temperatura °C.....	17,2	17,8	17,8	16,3	14,5	12,2	11,4	13,8	15,6	17,8	19,2	18,2	16,0
I.....	6,49	6,84	6,84	5,98	4,91	3,86	3,48	4,65	5,60	6,84	7,67	7,07	70,23
Evapotransp. potencial no ajustada.	66	70	70	60	50	37	33	46	56	70	80	73	
Evapotransp. potencial ajustada...	74	69	73	58	48	34	31	45	56	75	86	82	731
MAGDALENA													
Temperatura °C.....	27,0	27,2	27,3	26,8	26,7	25,4	25,8	26,2	27,5	27,7	27,3	27,6	26,9
I.....	12,85	12,99	13,07	12,70	12,63	11,71	11,99	12,28	13,21	13,36	13,07	13,28	153,14
Evapotransp. potencial no ajustada.	139	142	143	139	138	115	122	132	143	146	142	145	
Evapotransp. potencial ajustada...	155	139	150	136	137	109	119	132	143	156	151	162	1689

CUADRO II. — Balance hídrico

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Añoal
MAGDALENA													
Precipitación.....	301	284	304	119	66	22	3	16	32	124	248	276	1,703
Evapotransp. potencial (en mm)...	155	139	150	136	137	109	119	132	143	156	151	162	1,690
Evapotranspiración real.....	150	139	150	136	137	34	3	16	32	124	151	162	1,239
Exceso de agua.....	146	109	154	0	0	0	0	0	0	0	0	110	519
Deficiencia de agua.....	0	0	0	0	0	74	116	116	111	32	0	0	449
Almacenaje de agua útil.....	100	100	100	83	12	0	0	0	0	0	96	100	
COPACABANA													
Precipitación.....	160	151	131	131	140	33	9	24	54	55	42	176	975
Evapotransp. potencial (en mm)...	59	58	57	44	42	34	36	42	47	63	64	68	614
Evapotranspiración real.....	59	58	57	44	42	34	36	42	47	63	64	68	614
Exceso de agua.....	102	93	74	87	98	0	0	0	0	0	0	0	192
Deficiencia de agua.....	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Almacenaje de agua útil.....	100	100	100	100	100	99	72	64	66	53	31	100	
APOLO													
Precipitación.....	146	126	159	129	79	62	79	48	59	85	120	172	1,264
Evapotransp. potencial (en mm)...	96	97	90	76	72	62	68	72	85	88	92	96	974
Evapotranspiración real.....	96	97	90	76	72	62	68	72	85	88	92	96	974
Exceso de agua.....	50	49	69	53	7	0	11	0	0	0	0	51	290
Deficiencia de agua.....	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Almacenaje de agua útil.....	100	100	100	100	100	100	100	76	50	47	75	100	

REVISTA DE LA FACULTAD DE AGRONOMÍA (38) EP. I, XXXIV (2), LA PLATA, 1938

CUADRO II (Continuación)

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Annual
SANTA CRUZ													
Precipitación.....	176	156	170	72	84	104	71	51	68	95	132	146	1.325
Evapotransp. potencial (en mm)...	147	124	123	93	78	57	61	91	110	127	148	150	1.309
Evapotranspiración real.....	147	124	123	93	78	57	61	91	110	113	132	146	1.275
Exceso de agua.....	0	0	8	0	0	32	10	0	0	0	0	0	50
Deficiencia de agua.....	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14	16	4	34
Almacenaje de agua útil.....	29	61	100	79	85	100	100	60	18	0	0	0	
PAROTANI													
Precipitación.....	173	133	64	21	5	1	3	4	11	24	50	94	586
Evapotransp. potencial (en mm)...	105	88	92	69	42	33	34	46	70	87	111	118	895
Evapotranspiración real.....	105	88	92	69	31	1	3	4	11	24	50	94	572
Exceso de agua.....	0	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12
Deficiencia de agua.....	0	0	0	0	11	32	31	42	59	63	61	24	323
Almacenaje de agua útil.....	68	100	72	26	0	0	0	0	0	0	0	0	
SUCRE													
Precipitación.....	234	161	83	15	8	10	3	3	31	48	60	81	737
Evapotransp. potencial (en mm)...	68	50	64	62	51	42	39	53	59	68	71	72	969
Evapotranspiración real.....	68	50	64	62	51	20	3	3	31	48	60	72	532
Exceso de agua.....	75	111	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	205
Deficiencia de agua.....	0	0	0	0	0	22	36	50	27	20	11	0	166
Almacenaje de agua útil.....	100	100	100	53	10	0	0	0	0	0	0	9	

O. ANTEZANA PARDO, *Climas de Bolivia*

ANEXO II

CUADRO II (Conclusión)

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Annual
VILLA MONTES													
Precipitación.....	154	124	167	56	38	14	8	1	1	42	75	98	778
Evapotransp. potencial (en mm)...	177	151	117	78	57	40	33	65	89	151	162	176	1.296
Evapotranspiración real.....	154	124	117	78	57	24	8	1	1	42	75	98	778
Exceso de agua.....	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Deficiencia de agua.....	23	27	0	0	0	16	35	64	88	108	87	78	516
Almacenaje de agua útil.....	0	0	50	29	10	0	0	0	0	0	0	0	
UYUNI													
Precipitación.....	49	40	14	0	0	0	0	0	0	2	0	18	123
Evapotransp. potencial (en mm)...	79	65	73	59	45	11	15	12	39	41	61	81	581
Evapotranspiración real.....	49	40	14	0	0	0	0	0	0	2	0	18	123
Exceso de agua.....	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Deficiencia de agua.....	30	25	59	59	45	11	15	12	39	39	61	63	458
Almacenaje de agua útil.....	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

CUADRO III. — Balance hídrico anual de 49 localidades bolivianas

Localidad	Latitud sur	Altura m	Precip. mm	Evapot. potenc. mm	Evapot. real mm	Exceso agua mm	Defic. agua mm	Tipo climático
Guayaramerín	10°48'	170	1837	1645	1271	554	374	B ₁ A'w a'
Cohija	11°00'	260	1972	1415	1246	727	169	B ₂ A'r a'
Riberaita	11°05'	172	1891	1590	1307	592	283	B ₁ A'w a'
San Joaquín	12°40'	200	1492	1611	1239	255	372	C ₂ A'r a'
Santa Ana	13°50'	220	1842	1615	1389	452	226	B ₁ A'r a'
Magdalena	14°00'	236	1759	1689	1239	519	449	C ₂ A'w a'
Rurrenabaque	14°20'	200	2198	1512	1512	686	0	B ₂ a'r a'
Trinidad	14°40'	236	2053	1597	1536	519	61	B ₁ A'r a'
S. Ignacio de Marbán.	14°45'	220	2044	1501	1473	569	28	B ₁ A'r a'
Apolo	14°55'	1382	1265	974	974	291	0	B ₁ B'r a'
San Borja	14°58'	226	1912	1543	1543	393	0	B ₁ A'r a'
Sorata	15°45'	2647	935	751	615	327	135	B ₂ B'w a'
Ascensión de Guarayos	16°00'	247	939	1420	939	0	482	C ₁ A'd a'
Copacabana	16°10'	3820	1106	614	614	492	0	B ₂ B'r a'
Concepción	16°15'	490	1502	1331	1171	332	160	C ₁ A'r a'
S. Ignacio de Velasco	16°20'	370	1327	1453	1192	135	261	C ₁ A'd a'
El Alto	16°30'	3658	894	570	570	322	0	B ₂ C'r a'
San Javier	16°30'	710	1078	1101	938	139	163	C ₂ B'r a'
La Paz	16°30'	3632	568	608	533	35	75	C ₁ B'd a'
Guaqui	16°36'	3812	730	549	518	211	31	B ₁ C'r a'
Viscachani	17°12'	3789	405	532	405	0	128	C ₁ C'd a'
Chapirca	17°12'	4000	707	555	530	179	25	B ₁ C'r a'
Cochabamba	17°23'	2570	508	787	508	0	279	D B'd a'
Pairumani	17°23'	—	572	775	496	76	277	C ₁ B'd a'
Villa Aroma	17°27'	3820	240	506	240	0	267	D C'd a'
Vacas	17°32'	—	502	616	439	61	178	C ₁ B'd a'
Angostura	17°32'	2695	491	731	441	48	290	C ₁ B'd a'
Parotani	17°33'	2500	586	895	572	12	323	C ₁ B'd a'
Santa Cruz	17°35'	437	1325	1309	1275	50	34	C ₂ A'r a'
Charaña	17°36'	4059	460	589	460	0	129	C ₁ B'd a'
Anzaldo	17°40'	2800	783	775	582	201	193	C ₂ B'w a'
La Joya	17°49'	3702	306	591	306	0	295	D B'd a'
San José	17°55'	397	1084	1500	1084	0	417	C ₁ A'd a'
Oruro	17°58'	3706	463	607	463	0	144	C ₁ B'd a'
Valle Grande	18°00'	2100	998	792	737	263	55	B ₂ B'r a'
Roboré	18°20'	300	1304	1577	1292	0	285	C ₁ A'd a'
Pocoata	18°40'	3420	475	702	459	16	243	C ₁ B'd a'
Tacagua	18°52'	3754	347	562	347	0	215	D C'd a'
Puerto Suárez	19°00'	154	1319	1591	1251	62	340	C ₁ A'd a'
Sucre	19°00'	2850	746	699	531	213	169	C ₂ B'w a'
Potosí	19°30'	4002	342	579	329	13	250	D B'd a'
Camiri	20°06'	914	683	1176	683	0	493	D A'd a'
Uyuni	20°27'	3650	123	581	123	0	459	E B'd a'
Villamontes	21°16'	400	778	1296	778	0	516	D A'd a'
Tupiza	21°26'	2959	361	748	361	0	386	D B'd a'
Tarija	21°30'	1905	771	951	659	112	290	C ₁ B'w a'
Sanandita	21°40'	914	881	990	811	71	180	C ₁ B'd a'
Yacuiba	22°00'	580	920	1148	909	11	239	C ₂ A'w a'
Villazón	22°07'	3450	308	584	308	0	277	D B'd a'

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- BURGOS, J. J. 1950. *El evapotranspirómetro de Thornthwaite*. -- *Rev. Fac. de Agronomía*, XXVII : 221-231. La Plata.
- BURGOS, J. J. y A. L. VIDAL. 1951. *Los climas de la República Argentina, según la nueva clasificación de Thornthwaite (1948)*. -- *Revista Meteoros*, 1 : 3-32. Buenos Aires.
- CÁRDENAS, M. 1945. *Aspecto general de la vegetación en Bolivia y Recursos naturales de la vegetación en Bolivia*. -- *Plants and Plant Science in Latin America*, XVI : 312-315.
- CONTRERAS ARIAS, A. 1939. *El problema de la clasificación de los climas*. -- *Revista de Agricultura*, D.A.P.P. México.
- 1945. *Observaciones de evapotranspiración*. -- Tacubaya (México).
- 1948. *La medida de la evapotranspiración como base para la solución de problemas agrícolas importantes*. -- *Rev. CHAPINGO*, 21 : 1-8. Chapingo (México).
- DE MARTONNE, E. 1926. *Une nouvelle fonction climatologique: l'indice d'aridité*. -- *La Météorologie*, octubre 1926 : 449-458.
- 1941. *Nouvelle carte mondiale de l'indice d'aridité*. -- *La Météorologie*, enero 1941 : 3-26.
- ESCOBAR, V. I. 1948. *Contribución al estudio del tiempo en Bolivia*. -- *Publ. del Ministerio de Agr. Ganad. y Colonización*. La Paz (Bolivia).
- GENTILI, J. 1952. *Estimating Potential Evapotranspiration in Australia. The Search for a Formula*. -- *Univ. of Western Australia Geogr. Lab., Res. Rep.*, nº 40, 20 pp.
- KLAGES, K. H. W. 1942. *Ecological Crop Geography*. -- MacMillan, 615 pp. New York.
- KÖPPEN, W. 1884. *Die Wärmezonen der Erde, nach der Dauer der heissen gemässigten und kalten Zeit und nach der Wirkung der Wärme auf die organische Welt betrachtet*. -- *Meteor. Zeitschr.* 1 : 215-226.
- MELVYN HOWE, G. 1953. *Climates of the Rhodesia and Nyasaland, according to the Thornthwaite classification*. -- *Geographical Review*, octubre 1953, pp. 525-539.
- PRADA ESTRADA, R. 1946. *Clima de Bolivia*. -- *Publ. del Ministerio de Agr. Ganad. y Colonización*, 52 pp. La Paz (Bolivia).
- SANDERSON, M. 1948. a) *An experiment to measure potential evapotranspiration*. -- *Can. J. Research*, Sec. C, 26 : 445-454.
- 1948. b) *The climate of Canada according to the New Thornthwaite Classification*. -- *Reprinted from Scientific Agriculture* 28 : 501-517, 9 figs., noviembre 1948.
- SEKIGUTI, T. 1950. *Climatological water balance problem in Japan*. -- *The Geographical Magazine*, marzo 1950, pp. 197-198. Tokyo.
- SIRRI ERİNÇ, 1949. *Climatic types and the variation of moisture regions in Turkey*. -- *Geographical Review*, abril 1949, pp. 224-235.
- SMITH, J. WARREN, 1920. *Agricultural Meteorology*. -- MacMillan Co., 304 pp. New York.

- STENZ, E. 1950. *Condiciones meteorológicas del Altiplano*. — *Rev. Nimbus*, N^{os}. 6-7. Soc. Meteorológica de Bolivia, La Paz.
- THORNTHWAITE, C. W. 1931. *The climates of North America, according to a new classification*. — *Geographical Review*, octubre 1931, pp. 633-655.
- 1946. *El agua en la agricultura*. — *Irrigación en México*, 2 : 19-43.
- 1948. *An approach toward a rational classification of climate*. — *Geographical Review*, enero 1948, pp. 55-94.
- 1951. *The water balance in tropical climates*. — *Bulletin of the American Meteorological Society*, 5 : 166-173.
- YEPES, J. 1950. *Definición de ambientes naturales en el Altiplano Boliviano*. — *Rev. Nimbus*, N^{os}. 6-7. Soc. Meteorológica de Bolivia, La Paz.
- Datos estadísticos del Servicio Meteorológico de Bolivia.