

LA RADIACION NETA Y LA EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL (ETP)
 EN EL ALTIPLANO BOLIVIANO

J. VACHER ^x O. ATTEIA ^x E. IMAÑA ^{xx}

con la colaboración técnica de

J. CHOQUEVILLCA ^{xx} R. MALDONADO ^{xx} A. MENDEZ ^{xx}

INTRODUCCION

Una de las características más importantes del clima del Altiplano es el riesgo de sequía durante la temporada agrícola. El estudio de este factor muy limitativo de la producción agrícola no sólo puede circunscribirse al análisis de las precipitaciones, sino también a un conocimiento preciso de las necesidades en agua para los cultivos. Estas necesidades de agua se determinan generalmente a partir de los datos de evapotranspiración potencial (ETP). La falta de mediciones directas de la ETP (por evapotranspirómetros de balanza, lisímetros de drenaje, aparatos tipo BEARN o SAMER) en el Altiplano Boliviano, conduce a una estimación indirecta a través de fórmulas empíricas haciendo uso de la información climática disponible. A pesar de haber utilizado numerosas fórmulas de estimación de la ETP para el Altiplano Boliviano, la precisión y la validez de las mismas casi nunca fueron verificadas. Esta ausencia de referencia precisa nos ha conducido a estimar la ETP para el Altiplano utilizando una fórmula con bases teóricas muy fuertes y presentando el mínimo de ajustes empíricos. La fórmula escogida es de tipo PENMAN, (1948). La validez y la precisión de esta fórmula fue recomendada y verificada por varios autores (PERRIER, 1975; SEGUIN, 1982). Ha sido demostrado teóricamente y experimentalmente (PERRIER, 1977; MONTHENY y al., 1981, 1986) que la evapotranspiración era, ante todo, un fenómeno energético en el cual la fuente era la radiación neta (Rn). Este factor principal de la ETP no fue nunca medido en el Altiplano pero, fue siempre estimado según fórmulas empíricas no verificadas. Por otra parte, en el estudio agroclimatológico de la zona andina, FRERE y al (1975) han señalado la influencia de la altura sobre las características del balance radiativo, teniendo como objetivo un conocimiento preciso de la ETP pues era necesario realizar un análisis del balance radiativo. Los resultados obtenidos permiten

^x ORSTOM, CP 8714, La Paz-Bolivia

^{xx} SENAMHI, CP 20996, La Paz-Bolivia



determinar una fórmula de estimación de la R_n y ajustar, para el Altiplano Boliviano, una fórmula precisa de la EIP que permita estudiar sus variaciones espacio temporales.

I. ANÁLISIS DEL BALANCE RADIATIVO EN EL ALTIPLANO BOLIVIANO

Para el estudio del balance radiativo se instalaron en abril 1987 dos estaciones meteorológicas automáticas con mediciones de radiación solar global (R_g), radiación neta (R_n) y de temperatura de la superficie del suelo para una estimación de la radiación terrestre (R_t) según la fórmula de Stefan Boltzman. Las mediciones se registran en forma diaria y trihorarias. Estas estaciones se instalaron en dos zonas del Altiplano muy contrastadas, en base a sus condiciones climáticas. La primera, Viacha, corresponde al Altiplano lluvioso (promedio anual de precipitaciones $P=630$ mm. con un riesgo de déficit hídrico marcado de los cultivos del orden del 30% (ATTEIA y al, 1988). La segunda, Patacamaya, representa el Altiplano seco ($P=406$ mm. y riesgos de déficit hídrico del orden del 70%).

El balance radiativo se expresa mediante la relación $R_n = (1-a) R_g - R_t + R_a$ (1) con R_a = radiación atmosférica; a : albedo. De acuerdo a la cobertura vegetal de cada lugar donde se instalaron las estaciones se eligió un albedo igual a 0.2.

1) Radiación solar global (R_g)

La radiación solar global en el Altiplano Boliviano es elevada; los promedios anuales son superiores a 500 cal/cm^2 día (Cuadro 1, fig. 1 y 2). Los cocientes entre la R_g y la R_{go} (radiación solar global al tope de la atmósfera) están en el orden del 70%, traduciendo así, el menor espesor y la mayor transparencia de la atmósfera en el Altiplano a 4000 m. Una variación estacional es observada. Su amplitud, sin embargo, es reducida (30 a 40 %); el aumento de la R_{go} coincide con la época de lluvia donde existe mayor nebulosidad. Las diferencias de ocurrencia de las máximas y mínimas entre Viacha (septiembre, marzo) y Patacamaya (diciembre, junio) son debidas a sus diferentes regímenes de precipitaciones.

La radiación solar en el Altiplano es elevada, en particular, durante la temporada agrícola, lo que da lugar - sin otros factores limitantes - a una actividad fotosintética intensa y una importante producción vegetal.

2) Radiación neta (R_n)

Al contrario de la R_g , los valores de la R_n son particularmente bajos (cuadro 1), los promedios anuales son del orden del

CUADRO 1
 EVOLUCION DE RG Y RN (Cal. $\text{cm}^{-2} \text{d}^{-1}$)

	VIACHA			PATACAMAYA		
	RG	RN	RN/RG	RG	RN	RN/RG
A	504	121	0,25	485	82	0,17
M	486	107	0,22	437	76	0,17
J	432	82	0,19	435	65	0,15
J	509	85	0,17	444	81	0,19
A	502	96	0,19	532	85	0,16
S	573	128	0,23	569	108	0,19
O	554	134	0,25	592	131	0,23
N	533	139	0,26	565	148	0,26
D	564	147	0,26	639	154	0,24
E	468	137	0,29	531	169	0,32
F	543	152	0,28	585	178	0,31
M	384	121	0,32	460	136	0,29
PA	504	121	0,24	525	111	0,21
PA : promedio anual				523	118	0,22

110 a 120 cal/cm² día. La RN en el Altiplano representa solamente 22% de la RG para Patacamaya y 24% de la RN para Viacha. En los países tropicales, al nivel del mar, estos valores son del orden del 40% a 60% (RIOU, 1974). Esta disminución de la Rn con la altura, señalada ya por FRERE (1974), indicaba, no obstante, una extrapolación de los datos de RN medidos según un gradiente de 0 a 3000 m., un cociente de 0,34 - 0,35, bastante superior a lo encontrado. Las variaciones de la RN son muy marcadas; las diferencias de RN son de 200% para Viacha y 300% para Patacamaya, con un mínimo en junio y un máximo en diciembre siguiendo a la evolución del RGo.

Estos primeros resultados sobre la RG y la RN en el Altiplano ponen en evidencia condiciones radiativas muy favorables para la agricultura. En efecto, a un RG elevado, factor de una fotosíntesis intensa corresponde una Rn baja, factor de una ETP reducida.

3) Balance radiativo de onda larga

La RN es el resultado del balance radiativo, sus valores bajos con una RG alta, deben corresponder entonces a un balance radiativo de onda larga (Rt-Ra) elevado, lo que se confirma de acuerdo a los valores encontrados (cuadro 2). Los promedios anuales son 137 W/m² para Viacha y 145 W/m² para Patacamaya. Las variaciones intraanuales siguen de una manera general, al nivel mensual, las variaciones de RG (fig. 1 y 2). Esta evolución sincrónica induce a una reducción de los valores y de la amplitud de las variaciones de Rn.

Las mediciones de la temperatura media de la superficie del suelo nos permiten hacer una estimación de la radiación terrestre según la fórmula de Stefan Boltzman siguiente: $R_T = \epsilon \cdot \sigma \cdot T_s^4$ (2) ϵ = emisividad, σ = constante, T_s = temperatura del suelo en Kelvin. La radiación atmosférica es deducida de la relación del balance radiativo. Los valores obtenidos (cuadro 2) ponen en evidencia, en el Altiplano, una radiación atmosférica muy reducida y una radiación terrestre relativamente elevada; los promedios anuales de la Ra son de 263 W/m² para Viacha y 259 W/m² para Patacamaya. Esta característica de la Ra, se explica por el menor espesor de la atmósfera y su mayor transparencia debido principalmente a una presión de vapor de agua muy baja. Esta última, medida a 1,50 m. tiene un promedio de 6,5 mb para Viacha y 5,4 mb para Patacamaya, y sobre todo en base a los datos obtenidos por globos onda se observa una reducción de 40% de la presión de vapor de agua entre 4000 y 5000 m. y 60% entre 4000 y 6000 m.

La superficie terrestre al recibir una RG intensa ve su temperatura elevarse netamente y emite entonces una radiación de onda larga elevada, los valores de Rt son, en su mayoría, superiores a 400 W/m².

FIG 1. EVOLUCION DE LAS RADIACIONES PARA VIACHA

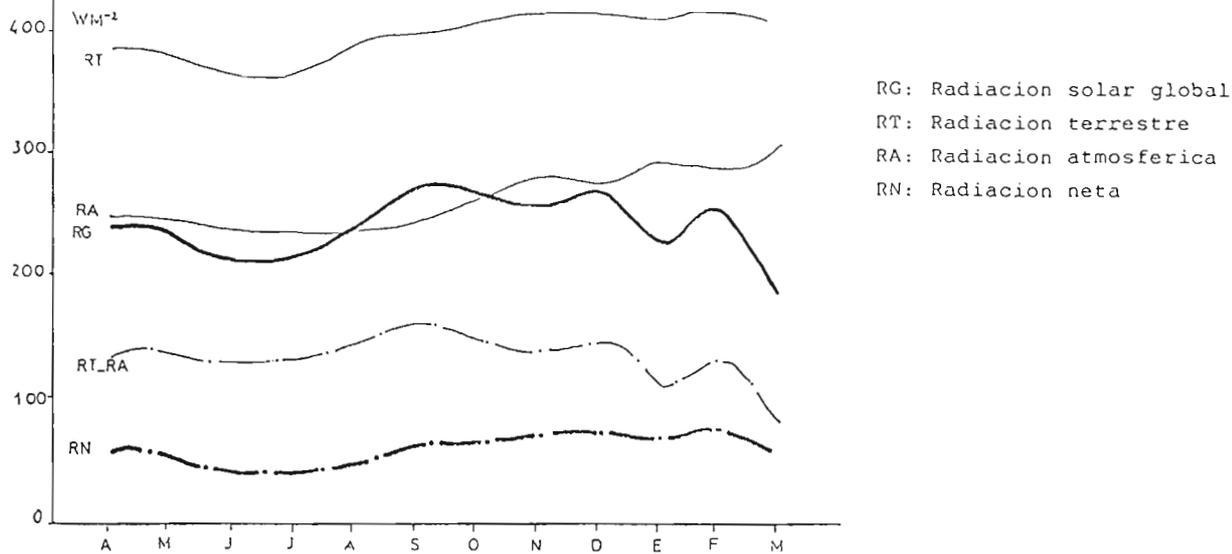


FIG 2. EVOLUCION DE LAS RADIACIONES PARA PATACAMAYA

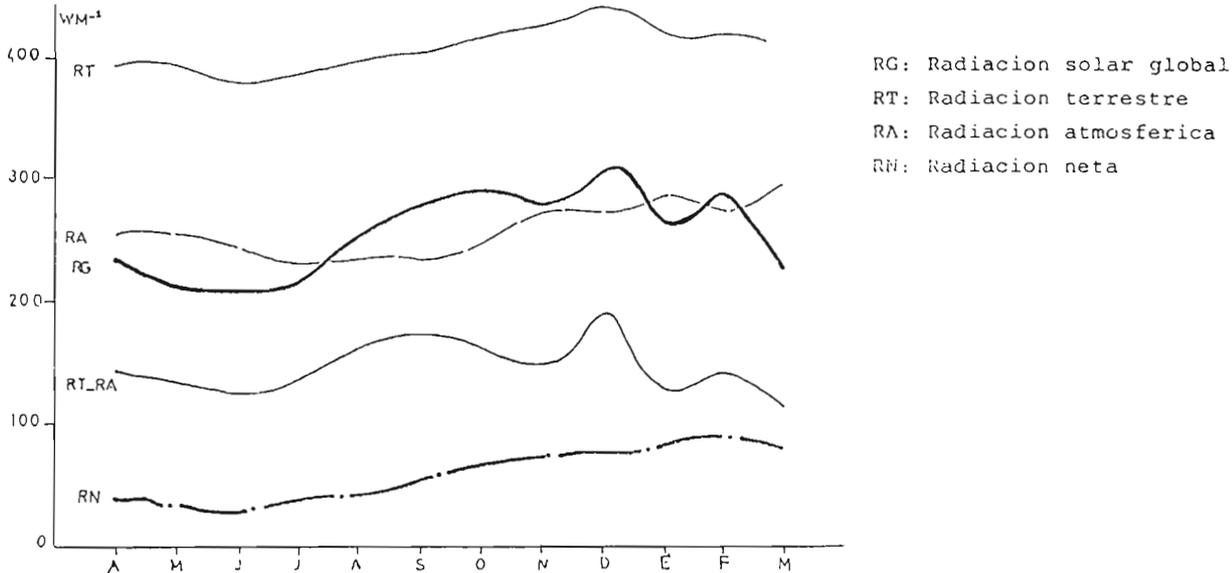
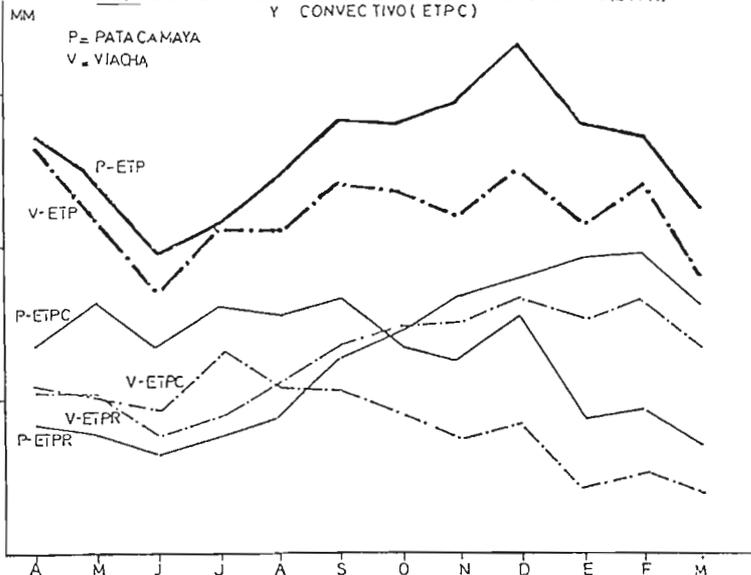


FIG:3 EVOLUCION DE LA ETP Y DE SUS TERMINOS RADIATIVO(ETPR) Y CONVECTIVO(ETPC)



CUADRO 2

EVOLUCION DE LA RADIACION DE ONDA LARGA ($W.m^{-2}$)

	VIACHA			PATACAMAYA		
	RT-RA	RT	RA	RT-RA	RT	RA
A	136	385	249	142	393	262
M	136	381	245	133	391	251
J	129	366	239	137	376	239
J	156	384	232	132	377	245
A	148	391	243	164	396	232
S	166	405	240	168	400	232
O	149	413	262	166	413	297
N	139	418	279	147	421	274
D	147	414	267	173	443	270
E	115	412	292	124	416	292
F	135	420	284	140	414	270
M	85	405	316	112	407	295
PA	137	400	263	145	404	259

PA : promedio anual

La concordancia de una RG elevada con las precipitaciones irregulares del Altiplano puede determinar, durante una época larga sin lluvia, una RG fuerte, con una Ra baja (aire seco) y una Rt alta; como durante una época precedida por lluvias intensas, una RG fuerte, con una Ra alta (aire muy húmedo) y una Rt baja (suelo húmedo). Eso impide la existencia de una relación lineal con un buen coeficiente de correlación entre RN - Ra y RG, propiedad sobre la cual se basan muchas fórmulas de estimación de la RN.

Los coeficientes de correlación son del orden de 0,8 a nivel mensual y anual pero, solo de 0,3 a nivel de diez días. Estos resultados subrayan la necesidad de determinar una fórmula de estimación de la RN en el Altiplano.

4) Estimación de la RN en el Altiplano Boliviano

La RN y la RG no están medidas en todas las estaciones meteorológicas, por lo que se estima a partir de parámetros climáticos fácilmente disponibles.

La fórmula de estimación de la RG es de tipo Black y utiliza los datos de heliógrafo. Se escribe :

$$RG = RGo \left(a + b \frac{h_i}{N} \right) \quad (3) \quad \begin{array}{l} n = \text{horas sol} \\ N = \text{duración del día} \\ a \text{ y } b = \text{parámetros} \end{array}$$

La fórmula de estimación del balance radiativo de onda larga (Rt-Ra) es de tipo Brunt y se escribe :

$$Rt - Ra = Ta^4 \left(c + d \frac{e}{N} \right) (f - g \sqrt{e})^4 \quad \text{con } Ta = \text{temperatura media del aire a 1,50 m.} \\ c, d, f, g = \text{parámetros} \\ e = \text{presión de vapor de agua en n bar}$$

La comparación de las mediciones diarias de RG, RN y de los valores de Rt-Ra con los valores calculados a partir de las fórmulas nos dan los resultados siguientes :

$$RG = RGo \left(0,28 + 0,57 \frac{h_i}{N} \right) \quad (5) \quad r = 0,95$$

$$Rt - Ra = Ta^4 \left(0,23 + 0,67 \frac{e}{N} \right) (0,8 - 0,09 \sqrt{e}) \quad (6)$$

Esta última fórmula muestra, no obstante, una regular sobrestimación estival y una subestimación invernal. Estas desviaciones estacionales provienen del término correctivo $(c + \frac{e}{N})$. Por esto se ha determinado para cada estación las fórmulas siguientes :

$$\text{Octubre - Marzo} : R_t - R_a = \sigma T_a^4 (0,33 + 0,67 \frac{p}{N}) (0,8 - 0,09 \sqrt{e}) \quad (7)$$

$$\text{Abril - Septiembre} : R_t - R_a = \sigma T_a^4 (0,14 + 0,67 \frac{p}{N}) (0,8 - 0,09 \sqrt{e}) \quad (8)$$

La estimación de la RN es para todo el año :

$$RN = 0,8 RGo (0,28 + 0,57 \frac{p}{N}) - \sigma T_a^4 (0,23 + 0,67 \frac{p}{N}) (0,8 - 0,09 \sqrt{e}) \quad (9)$$

II. La ETP en el Altiplano Boliviano

1) Estimación de la ETP

El objetivo principal de este estudio es determinar los valores más precisos de la ETP en el Altiplano Boliviano. La fórmula elegida es de tipo Penman : $ETP = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} RN + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} E_a$ (10)

Δ : pendiente media de la curva de presión máxima de vapor de agua

γ : constante psicrométrica

E_a : término convectivo

- El término radiativo se estima según las fórmulas 7, 8 y 9 que hemos determinado.

- El término convectivo se estima según la fórmula de tipo Dalton propuesta por Penman (1948).

$$E_a = 0,26 (e_s - e) (1 + 0,54 U) \quad (11)$$

U = velocidad del viento en m/s a 2 m -

e_s = presión máxima de vapor de agua

La fórmula adaptada al Altiplano se escribe :

$$ETP = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} 0,8 RGo (0,28 + 0,57 \frac{p}{N}) - \sigma T_a^4 (0,22 + 0,63 \frac{p}{N}) (0,08 - 0,09 \sqrt{e}) + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} 0,26 (e_s - e) (1 + 0,54 U) \quad (2)$$

(1): es importante tener en cuenta las variaciones de con la altura

(2): se precisan los valores de ETP utilizando las fórmulas 7 y 8

2) Variaciones espaciotemporales de la ETP en el Altiplano Boliviano

El estudio de las variaciones espaciotemporales de la ETP en el Altiplano Boliviano se basa en el análisis de los valores de la ETP calculadas a partir de los datos de las estaciones automáticas meteorológicas y a partir de la ETP calculada según los datos disponibles en el SENAMHI de 3 estaciones

climáticas (El Alto, Belén, y Patacamaya) para 5 años (de 1976 a 1980) con regímenes pluviométricos muy diferentes. Por la precisión y la fiabilidad de los datos de las estaciones automáticas, empezaremos con el análisis de la evolución de la ETP en Viacha y Patacamaya de abril 1987 a marzo 1988.

- Variaciones de la ETP en Viacha y Patacamaya de abril 1987 a marzo 1988

De acuerdo con los resultados obtenidos sobre la R_n , la ETP en Viacha y Patacamaya presenta valores muy bajos (cuadro 3). Los promedios anuales son respectivamente de 2,15 mm/día y 2,58 mm/día, o sea totales anuales de 770 mm y 953 mm. Los valores de los términos radiativo y convectivo de la ETP (cuadro 3) y las tendencias de las curvas representándolas (fig 3) conducen a las observaciones siguientes :

- Los valores bajos de la ETP en el Altiplano Boliviano son consecuencias de un doble fenómeno. El principal fenómeno se debe a los valores bajos de la R_n que inducen un término radiativo reducido. El segundo fenómeno es la evolución contraria del término convectivo y del término radiativo, resultado de un verano lluvioso.

- Los términos radiativos de Viacha y Patacamaya son muy similares de acuerdo a los valores de R_n .

Los términos convectivos muestran, al contrario, grandes diferencias (son del orden del 50%). Una presión de vapor de agua más baja (5,4 contra 6,5) y un viento más importante (3,2 m/s contra 2,4 m/s) en Patacamaya que en Viacha, explican estas divergencias del término convectivo. Este último aparece como el factor de las variaciones espaciales de la ETP en el Altiplano. Representa 50% de la ETP en Patacamaya y 40% en Viacha.

- La ETP muestra un máximo en diciembre y un mínimo en junio, siguiendo principalmente la evolución de la R_n . La amplitud de estas variaciones estacionales al nivel mensual son reducidas de 1,7 mm, 2,49 mm para Viacha y de 1,97 mm, 3,33 mm para Patacamaya. El máximo diario de la ETP en Viacha es de 3,73 mm y de 4,07 en Patacamaya. Es importante subrayar que casi con 800 datos diarios, hemos observado una sola ocurrencia de una ETP superior a 4 mm.

- Variaciones de la ETP para las estaciones de Belén, El Alto y Viacha de 1976 a 1980

Los resultados obtenidos confirman las conclusiones precedentes. Los promedios calculados sobre 5 años son de 2,89 mm para Patacamaya, 2,40 mm para Belén y 2,50 mm para Viacha. Las variaciones de la ETP durante este período de diez días son de

CUADRO 3

EVOLUCION DE LA ETP Y SUS TERMINOS
radiativo y convectivo
(mm/día)

	VIACHA			PATACAMAYA		
	ETP	Trad	Tcon	ETP	Trad	Tcon
A	2.26	1.20	1.06	2.16	0.87	1.29
M	2.18	1.09	1.09	2.46	0.79	1.67
J	1.71	.79	0.92	1.97	0.64	1.32
J	2.12	.79	1.32	2.14	0.78	1.36
A	2.12	1.01	1.11	2.42	0.88	1.54
S	2.40	1.35	1.05	2.82	1.16	1.66
O	2.37	1.45	0.92	2.80	1.44	1.36
N	2.23	1.50	0.73	2.94	1.70	1.24
D	2.49	1.66	0.83	3.33	1.80	1.53
E	1.96	1.52	0.44	2.80	1.92	0.88
F	2.21	1.69	0.52	2.90	2.00	0.92
M	1.78	1.32	0.46	2.25	1.60	0.65
PA	2.15	1.28	0.87	2.58	1.30	1.28

4,3 mm y 0,9 mm para Patacamaya, 3,6 mm y 0,8 mm para Belèn y 3,7 mm y 0,6 mm para El Alto. La ocurrencia de la máxima se produce siempre en diciembre y de la mínima en junio - julio. La ETP calculada a partir de la fórmula de Penman, no ajustada al Altiplano varía de 4 a 6 mm. Estas diferencias subrayan la importancia del error cometido. El aumento de la ETP según un gradiente norte-sur es confirmado por estos primeros resultados.

Para precisar nuestro análisis estudiaremos ahora, la influencia de algunos factores climáticos sobre las variaciones espacio-temporales de la ETP.

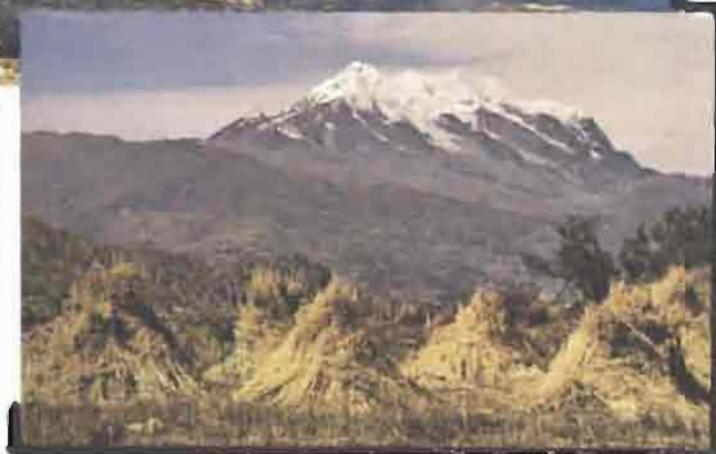
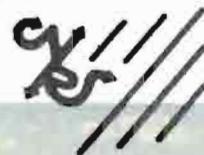
CONCLUSION

Este estudio nos ha permitido determinar las características muy particulares del balance radiativo en el Altiplano Boliviano. A una radiación solar global intensa (por la latitud y la altura del Altiplano) corresponde una radiación neta muy baja, consecuencia de una radiación atmosférica reducida (menor espesor y mayor transparencia (aire seco) de la atmósfera) y de una radiación terrestre relativamente elevada. Las condiciones radiativas en el Altiplano se presentan muy favorables para la agricultura. Una RG elevada favorece una fotosíntesis intensa y una producción vegetal importante y además, una RN baja induce pocas necesidades en agua para los cultivos. Estas propiedades de las radiaciones nos han conducido a ajustar las fórmulas de estimación de la RN y a proponer una nueva fórmula tipo Penman de la ETP para el Altiplano Boliviano. La ETP calculada con las mediciones de R_n y con esta nueva fórmula, para varias estaciones y diferentes años, se caracteriza por valores muy bajos (promedios anuales inferiores a 3 mm y máximo diario inferior a 4,5 mm) y una amplitud de variación reducida debido a la influencia de la altura y de un verano lluvioso. Estos resultados son sumamente importantes para el desarrollo de la producción agrícola; la puesta en evidencia de una ETP baja replantea toda una estrategia de riego a bajo costo en el Altiplano Boliviano. Estos resultados se basan, no obstante, sobre un corto periodo (un año) de mediciones de las radiaciones, las cuales deberán ser necesariamente verificadas.

BIBLIOGRAFIA

- ATTEIA, O.; VACHER, J., 1988 - Estudio de los riesgos de sequia en el Altiplano Boliviano, utilizando un modelo sencillo de balance hidrico. Informe ORSTOM, 20 pa
- FRERE, M.; RIJKS, J.Q.; REA, J., 1974 - Estudio agroclimatológico de la zona andina. FAO/OMM, 297 p.
- MONTHENY, B.; HUMBERT, J.; LHOMME, J.P.; KALMS, J.M., 1981 - Le rayonnement net et l'estimation de l'évapotranspiration en Côte d'Ivoire. Agric. Met., 23 : 45-59.
- MONTHENY, B.; ZELLER, B.; HAINNAUX, G., 1986 - Estimation des besoins en eau de la Canne à sucre en région soudano sahelienne pour la conduite de l'irrigation. In les besoins en eau des cultures. Paris : 79-102.
- PENMAN, H.L., 1948 - Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proc. R. Soc. London, Ser. A, 193 : 120-145.
- PERRIER, A., 1975 - Etude physique de l'évapotranspiration dans les conditions naturelles. Ann. Agron., 26 : 1-18.
- PERRIER, A., 1977 - Projet de définitions concernant l'évapotranspiration en fonction de considérations théoriques et pratiques. Météorologie, 11 : 7-16.
- PRIESTLEY, G.H.B. and TAYLOR, R.J., 1972 - On the assesment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters. Mons. Wheather Rev., 100 : 81-92.
- RIOU, C., 1974 - Determination pratique de l'évaporation, application à l'Afrique Centrale. Memo n° 80, ORSTOM Paris.
- SEGUIN, B., 1975 - Etude comparée des méthodes d'estimation d'ETP en climat méditerranéen du Sud de la France. Ann. Agro., 26 : 671-691.
- SEGUIN, B.; BRUNET, Y.; PERRIER, A., 1982 - Estimation of evaporation : a review of existing methods and recent developments In Meetings Simposium on evaporation. Leeds (G.B.). 23 p.
- STEWART, J.B., 1983 - A discussion of the relationships between the principal forms of the combination equation for estimating crop evaporation. Agric. Met., 30 : 111-127.
-

ACTAS DEL SEGUNDO SIMPOSIO DE LA INVESTIGACION FRANCESA EN BOLIVIA



LA PAZ 19-22 de Abril 1988