

APROXIMACION CLIMATICA DEL ALTIPLANO NORTE

N.J.Martinic, J. Rojas
Universidad Mayor de San Andrés, La Paz
B. Mamani P.
Consultor independiente
J. Vacher
Orstom, La Paz

Resúmen

Se investiga series temporales de los parámetros meteorológicos siguientes: humedad relativa, temperaturas mínima y máximas y precipitación pluvial de decenas de estaciones del Altiplano norte. Las estaciones del altiplano peruano son: Cabanillas, Lampa, Juliaca e Illpa, todas en inmediaciones del Lago Titicaca. La serie temporal más larga es la precipitación pluvial en la ciudad de La Paz que empieza en 1907, posiblemente la serie más larga del país. Se discute el llamado efecto invernadero en la región del altiplano norte donde el promedio de las temperaturas en bases diarias dan una indicación que contradice a un calentamiento general de dicho efecto invernadero, se compara con los valores de la temperatura máxima diaria del altiplano sur (Potosí), aunque las amplitudes de dichas oscilaciones anuales aumentan en función del tiempo corroborando dicho efecto. Asimismo, con las amplitudes de las oscilaciones anuales y semianuales de las series temporales aquí utilizadas se propone una explicación sinóptica de un clima en esta región.

Se utiliza transformadas de Fourier digitales de las series temporales para buscar periodicidades en lugares específicos del Altiplano y se intentan dar explicaciones de su génesis. La interacción entre el ciclo solar de las manchas solares a lo largo de este siglo y su correlación con las oscilaciones encontradas en los parámetros meteorológicos nos muestran una relación genética de estas magnitudes. En este contexto se ubican los intervalos pasados donde el efecto del llamado Niño es mas importante.

1. Introducción

Se denomina un sistema climático a un promedio del tiempo meteorológico en períodos largos. Digamos de decenas de años. Otro problema adyacente es el dilucidar si se puede predecir el clima en analogía al de predecir el "tiempo" meteorológico. Esto último es, como se sabe, difícil de predecir con una anticipación de varios días. No obstante que las observaciones son cada vez mas exactas, ya sea desde estaciones superficiales o desde cápsulas o sondas que circulan entorno a nuestro planeta. Se habla en general, de un clima terrestre, o de regionales. En este trabajo nos dedicaremos a una descripción del clima del Altiplano.

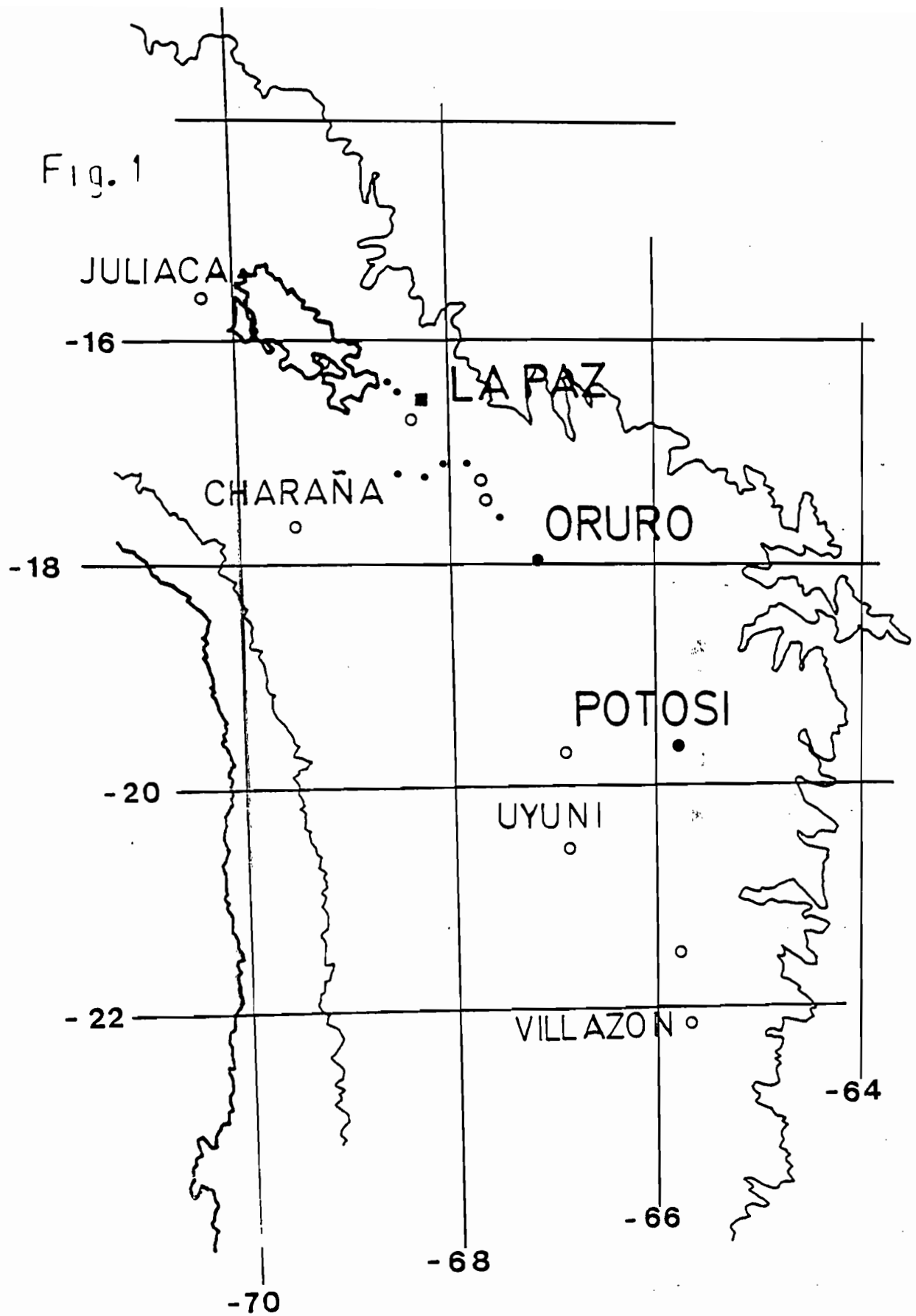
El Altiplano es una mesa enorme de aproximadamente 100 mil km². La altitud de esta mesa es del orden de 3800 m s.n.m. y en la parte norte de la misma se encuentra el lago navegable a mayor altura en el mundo. Políticamente una gran parte de esta región pertenece a Bolivia, aunque los países andinos vecinos (Perú, Chile y la Argentina) forman parte de la misma en una parte. Un esquema del Altiplano se encuentra en la Fig. 1. Las líneas de forma fractal que rodean al Altiplano son las curvas de nivel de aproximadamente 2000 m s.n.m. entre las que se encuentra el Altiplano. Encerrándolo por la parte occidental, la cordillera "occidental" que es una parte principal de los Andes que se ubican en forma paralela a la costa del Pacífico. Mas al norte y al sud en los Andes occidentales se encuentran los picos mas elevados de los Andes, a saber, el Chimborazo en el Ecuador y el Huascarán en el Perú. El otro borde del Altiplano es la llamada cordillera Real, que es el contrafuerte natural de las zonas bajas en varios países andinos. Si bien como norma los picos mas elevados se encuentran en la cordillera occidental, en Bolivia, también picos muy elevados se encuentran en ella, como el Illimani.

2. Equilibrio Energético en el sistema climático

Un sistema climático involucra procesos de interacción entre la tierra, agua, hielo con la fuente energética primaria, la radiación solar. Esta energía de entrada ha sido medida durante los años 1987-1988 por Vacher *et. al.*ⁱ para las estaciones de Patacamaya y Viacha. El valor promedio encontrado fue un poco mayor a 500 cal/cm² por día durante el mes de diciembre. Como se verá mas adelante, también fue medida la radiación neta promedio anual para ambas estaciones, que alcanzaron a 120 y 118 cal/cm² por día para Viacha y Patacamaya respectivamente. Se debe hacer notar que existe una variación anual para la radiación neta con un máximo en el mes de diciembre. Es oportuno asimismo puntualizar que los 500 cal /cm² por día constituye apenas un ~70% de la llamada constante solar de irradiación que alcanza a 1340 W/m² en el sistema convencional SI. La radiación solar atmosférica promedio para el Altiplano también fue medido por Vacher, alcanzándose valores ligeramente superiores a los valores medidos de la radiación solar. Dichos valores se pueden considerar como bajos. Vacher atribuye estos valores bajos a la poca densidad de la atmósfera altiplánica que permite que gran parte de irradiación terrestre se pierda.

La interacción no lineal que existe en los sistemas climáticos convencionales, tienen que ver con las escalas terrestres, donde la influencia importante para el calentamiento de la atmósfera es determinada básicamente por los océanos y no solo por las temperaturas en juego sino también por las humedades. Por otro lado, la atmósfera posee una macro circulación originada obviamente en la energía solar que es absorbida por la atmósfera, básicamente en ondas del infrarrojo. Una vez puesta en marcha estas circulaciones atmosféricas, interactúan con las corrientes marinas estableciéndose un fenómeno estacionario en la escala de muchos años. No se debe olvidar que las propiedades térmicas de la superficie terrestre a su vez afectan tanto a la atmósfera como a las superficies de los océanos. Todas estas interacciones infelizmente poseen tiempos de relajación diferentes entre sí, sin que ninguno sea un fenómeno mas dominante que los otros. Esa diversidad de tiempos de relajación dan la pauta del progreso de los sistemas climáticos. Es decir se trata de un sistema pseudo estacionario muy difícil de predecir a corto o largo alcance.

A continuación daremos un esquema de la interacción superficie atmósfera frente al motor energético que es la irradiación solar. En la fig. 2. sacado de Bengtsonⁱⁱ, especialmente los valores



UMSA meteorologia

que se encuentran en los cuadros, que son valores en W/m^2 y con números apropiados para latitudes no ecuatoriales y al nivel del mar. Ya se ha indicado los valores cuantitativos para el caso del Altiplano.

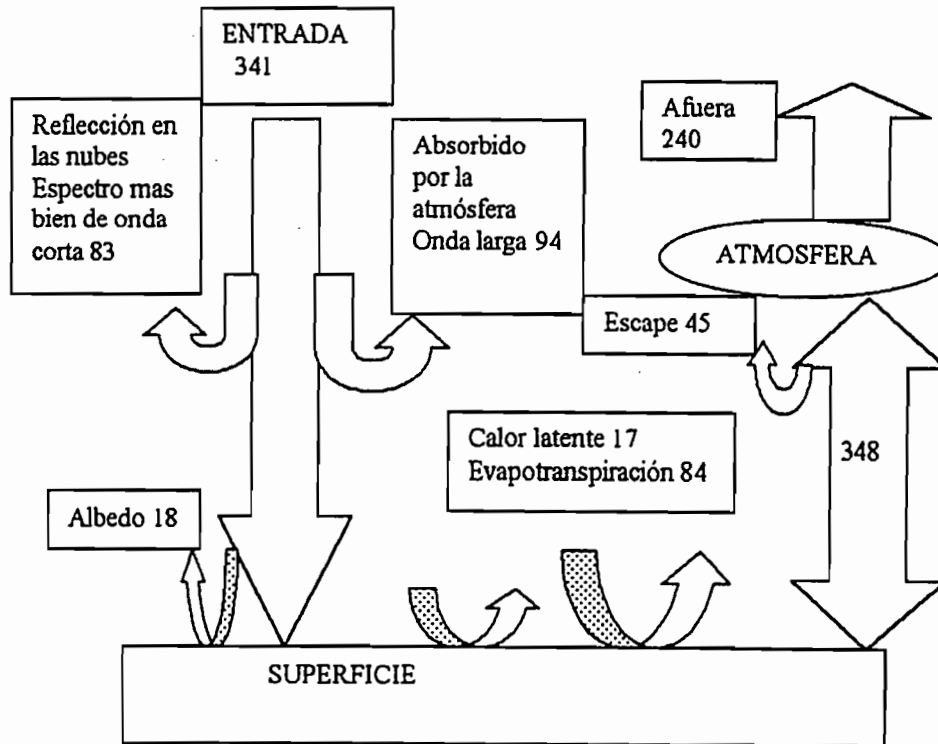


Figura 2

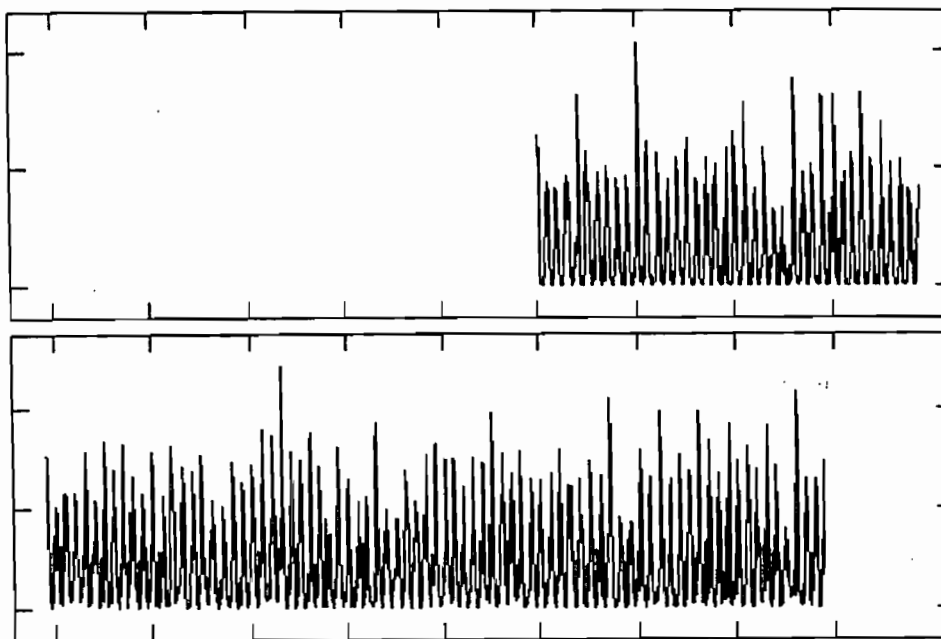
En la Fig. 2 se puede ver la entrada de la energía de irradiación solar que entra a la atmósfera ($341 W/m^2$, que es un poco menos de un tercio de la constante solar, comparado con el 70% de dicha constante para el Altiplano). Una buena parte se refleja ya sea directamente en las nubes o un albedo en la superficie. Otra fracción similar es absorbida por la atmósfera, en las longitudes de onda llamadas "largas", esto es en el espectro del infrarrojo. De la fracción que llega a la superficie y que es absorbida por ella, gran parte vuelve a la atmósfera mediante el llamado calor sensible, y sobre todo por la evaporación de las plantas "Transpiración". A saber, las plantas acumulan energía térmica para "hervir" el agua que por ellas circula y devolverla a la atmósfera. Este proceso no es inmediato, ya que tiene su tiempo de relajación apropiado al instante del ciclo biológico de la planta en especial. Visto, finalmente desde fuera de la tierra, la atmósfera "elimina" en las longitudes siempre del infrarrojo, energía de tal modo que el presupuesto energético de entrada y de salida siempre sea cero. Hay que pensar sin embargo, que desde el punto de vista de la superficie de la tierra frente a la atmósfera, hay un equilibrio de ondas largas que van y vuelven entre la atmósfera y la tierra con un valor absoluto mayor que el que llegaba originalmente del sol ($348 W/m^2$ que es mayor que el total de entrada que era de $341 W/m^2$). Este intercambio de infrarrojo es posible gracias a la facultad que tiene la atmósfera de "atrapar" fotones durante un

tiempo relativamente mayor que el ciclo diario. Los fenómenos que permiten este motor energético hay que referirlos a procesos físico, químicos y biológicos.

3. Parámetros Climáticos del Altiplano

Presentamos a continuación una selección de datos meteorológicos de algunas estaciones del Altiplano. El objetivo es simplemente el familiarizar algunos parámetros para intentar definir cuantitativamente un clima en esa región. Existe poca bibliografía sobre estos sujetos, debido básicamente a la dificultad de contar con una base de datos centralizada, o por lo menos fácilmente ascequible y que no muestre contradicción entre los valores similares obtenidos por distintos institutos. Una bibliografía adecuada es Johnsonⁱⁱⁱ y Escobar^{iv}. Sin embargo, existe una tendencia de los investigadores de tratar al clima altiplánico en el contexto de los climas andinos. Nosotros no estamos seguros que ese debe ser el método científico.

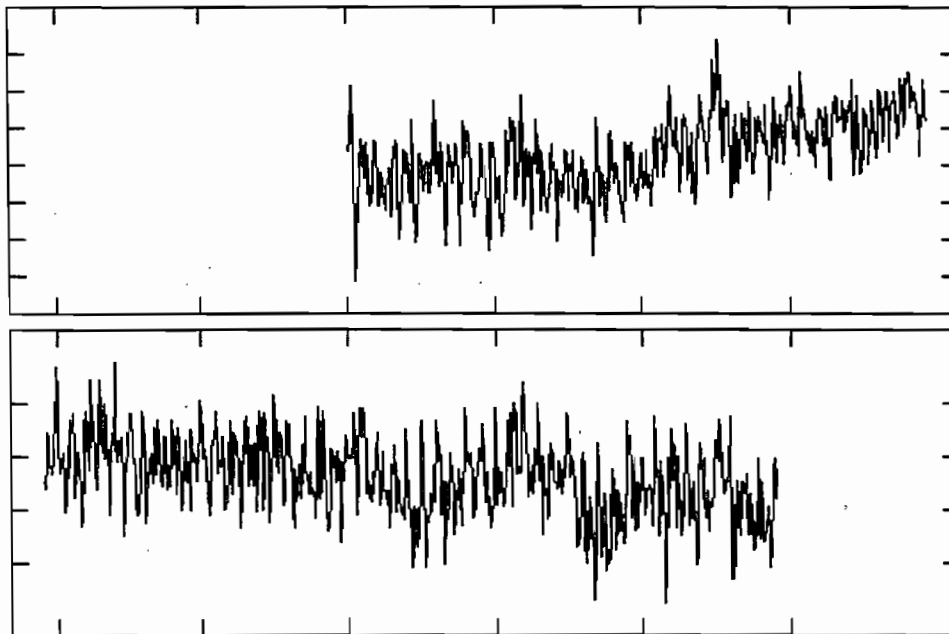
p. pluvial (1958-96) (Potosí) y: 0.0 287.4



p. pluvial (La Paz 1967-87) y: 0.0 243.7

Fig. 3. Serie temporal de la precipitación pluviométrica en Potosí (arriba) y La Paz (abajo).

Temperatura máxima (Potosi 1958-96) y: 9.8 22.8



temperatura máxima La Paz (1937-86) y: 12.5 21.6

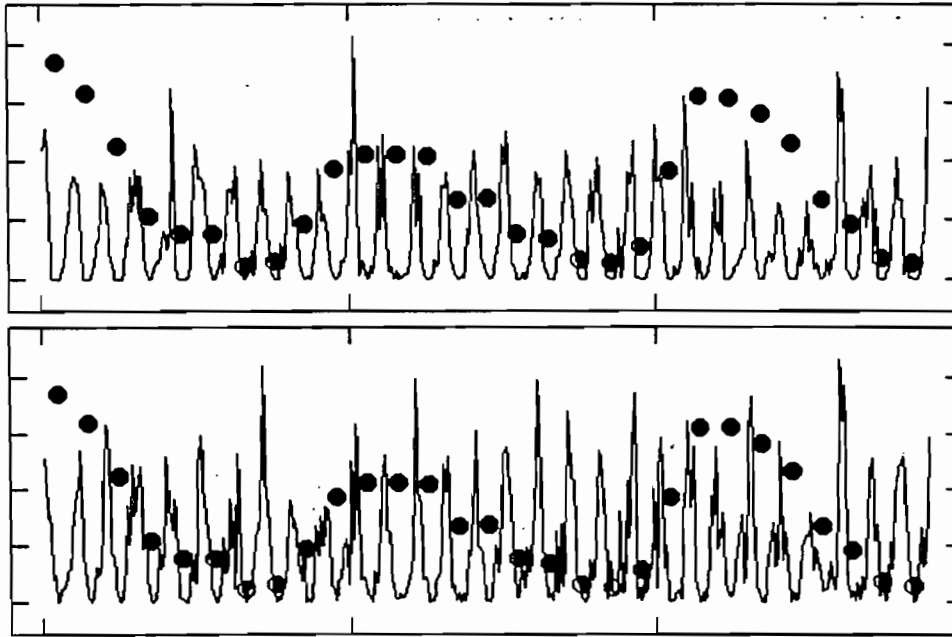
Fig. 4 Temperaturas máximas de Potosí y La Paz.

La serie temporal mas larga en los anales bolivianos climatológicos debe ser sin duda la precipitación pluvial de la ciudad de La Paz tomado por el Observatorio San Calixto^v. En la Fig. 3 se muestra dicha serie temporal (1907-1987). Asimismo en la Fig. 4 tambien se ha colocado las temperaturas máximos de la ciudad de La Paz con el objeto de verificar el mentado calentamiento atmosférico por el llamado efecto invernadero. Asimismo en dicha figs. 3-4, también se ha ploteado, por comparación la precipitación pluvial de la ciudad de Potosí asi como su temperatura máxima (1958-96). Estos últimos valores fueron obtenidos através de Senamhi.

Un hecho conspicuo aparece en las temperaturas máximas de ambas ciudades altiplánicas. Por una lado parecería que el efecto invernadero parece evidente en la ciudad de potosi pero que es inexistente en los datos de la ciudad de La Paz. Es mas se ve claramente una disminución paulatina durante el medio siglo de datos del observatorio San Calixto. La temperatura máxima de La Paz, obtenida por Senamhi y mostrado en el apéndice de este trabajo, contradice a la serie temporal del observatorio San Calixto. La serie temporal de La Paz obtenido por Senamhi e investigado por este trabajo va desde 1945 hasta 1990. La tendencia es completamente constante ni hay una tendencia al calentamiento como Potosí ni otra a un enfriamiento como muestra La Paz, San Calixto.

En la Fig. 5. se muestra un "blow-up" de la Fig. 3. Por un lado, en la parte superior la precipitación pluvial de la ciudad de Potosi y por otro, en la parte inferior, la precipitación pluvial de la ciudad de La Paz, ambos entre 1958-86. Por otro lado, superpuesto en ambos histogramas se han colocado los valores del número de Zurich de las manchas solares. Felizmente que el valor numerico promedio anual de las manchas solares es análogo al de los mm por mes de la precipitación pluvial.

P. pluvial Potosí (1958-86) y: 0.0 207.4



P. pluvial La Paz (1958-86) y: 0.0 216.5

Fig. 5 Superposición de las manchas solares (círculos llenos) sobre los valores mensuales de la precipitación pluvial para las dos estaciones altiplánicas. Obsérvese una tendencia de sequía en los años previos al período quieto solar.

La idea central de superponer ambos histogramas es el correlacionar la actividad solar con los problemas climatológicos extremos. Los valores mensuales de 1981-82 para la precipitación pluvial son los mínimos y que coinciden con la aparición de la corriente del Niño. Sin embargo, el ciclo de las sequías mas bien parecen existir en el ciclo solar del cambio de polaridad del campo magnético solar, que es de 22 años. Obviamente que para encontrar una correlación cuantitativa deberíamos abocarnos a varios ciclos de 22 años solares, cosa, que excepto los valores pluviométricos de la ciudad de La Paz, no es posible al carecer de dichos datos. En la parte inferior de la Fig. 3 se puede vislumbrar una especie de correlación con el ciclo del cambio de polaridad del campo heliomagnético.

ⁱ Vacher J., *et. al.*, Net Radiation and Evapotranspiration on the Bolivian Altiplano, III International Conference on southern Hemisphere Meteorology and Oceanography. American Meteorological Society, Boston, Mass.

ⁱⁱ Bengtsson L., Modelling and Prediction of the Climate System, *AvH Mitteilungen*, 69,3, 1997

ⁱⁱⁱ Johnson, A.M., One year in the Peruvian Andes. *Weather*, 25,11, 1970

^{iv} Escobar V. Y., Régimen Pluviométrico de Bolivia. Publicación del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Colonización, La Paz, 1948

^v Segaline Nieto H., y Cabré R. El Clima de La Paz, Observatorio San Calixto, La Paz, 1988

4. Series temporales de temperatura y humedad en el Altiplano

En la Fig. 6 se muestra una serie de las temperaturas mínimas de estaciones del Altiplano. Se trata de 21 años de datos diarios de la estación de Cabanillas, que se encuentra en el Altiplano peruano a cierta distancia del microclima del Titicaca. En la parte inferior se presenta además el promedio diario de los 21 años para esa misma estación. Los límites inferior y superior de esas temperaturas también se halla indicado en la figura.

caban -12.8 9.6 first year 1978 last year 1998 average -3.13 4.79

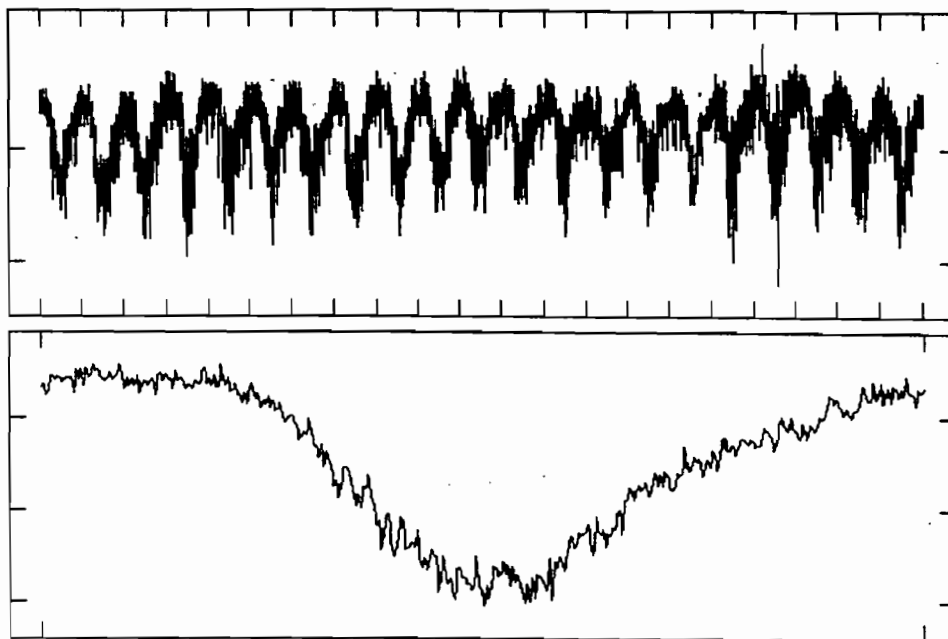
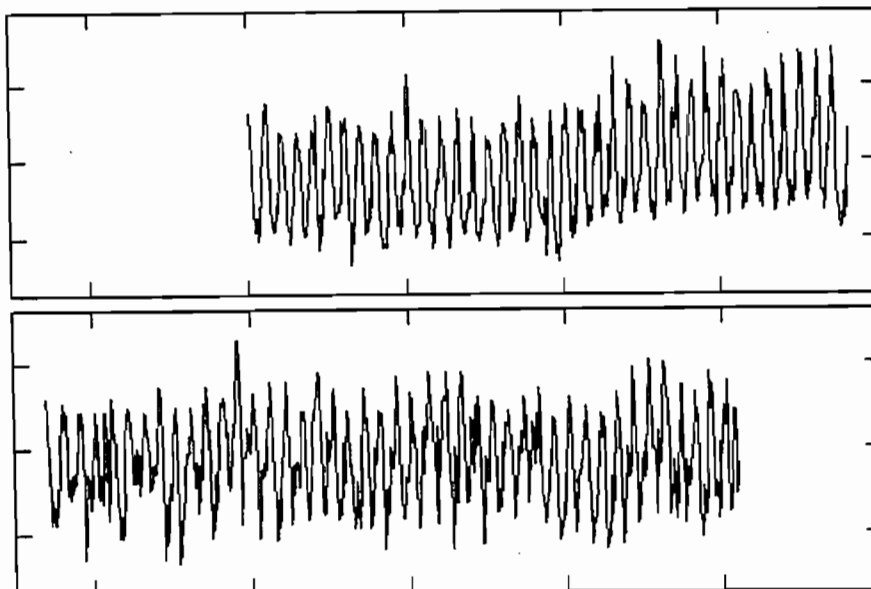


Fig. 6 Temperaturas mínimas de dos décadas de la estación meteorológica de Cabanillas. Los datos son diarios, y el histograma inferior es el promedio diario de dichas temperaturas durante los 21 años de esta estación que es característica para el altiplano norte.

Este gráfico posee características muy análogas con otras estaciones del altiplano central y norte. Es interesante el observar la homogeneidad de las temperaturas mínimas año tras año, que no es el caso para las máximas, como se puede verificar en otros gráficos.

En lo que respecta a la humedad relativa, es también interesante el comparar dos estaciones del altiplano. En la Fig. 7 se muestra la humedad relativa media mensual de La Paz con datos del observatorio de San Calixto y la de la ciudad de Potosí con datos de Senamhi.

Humedad relativa Potosí (1958-95) y: 13.1 71.4



Humedad relativa La Paz (San Calixto 1937-86) y: 33.9 26.9

Fig. 7 Humedad relativa media mensual de dos estaciones del altiplano norte y sud respectivamente.

Podemos observar en el gráfico superior, datos de la ciudad de Potosí, que los datos de la serie temporal va incrementando, contrariamente al de La Paz que tiene un comportamiento de tendencia constante. Es necesario verificar la calidad de estos datos debido a ese aumento sistemático de Potosí. Por otro lado, Potosí es positivamente mas seco que La Paz, sin embargo los valores son semejantes.

Además de esta observación vale la pena mencionar que el efecto del Niño sobre la humedad relativa parece ser contradictoria. Por un lado, se ve en los histogramas anteriores que la precipitación pluviométrica es mínima durante los periodos de sequías, sin embargo, la humedad relativa no parece ser afectado sobre estas sequías. Tanto en Potosí como en La Paz, durante 1981-82, durante la ocurrencia del Niño, las humedades relativas continúan relativamente constantes, por lo menos en cuanto a los máximos anuales se refiere. Esta conclusión provocativa no deja ser paradójica ya que el altiplano sur, Potosí, como regla general debe mostrar menor humedad relativa que la estación del Altiplano norte: La Paz.

Se debe también mencionar que existen series temporales de variables agroclimáticas como las de la temperatura mínima ya que hasta la fecha el objetivo del análisis meteorológico ha sido utilitario con fines de apoyo a la agricultura, sobre todo en el altiplano. Una serie temporal que muestra el comportamiento de las temperaturas máximas para la estación de Oruro se muestra en la Fig. 8. Los valores de dicha temperatura diaria están registrados sólo ocasionalmente durante cada mes.

5. Variaciones Anuales

En la Fig. 8 se muestra dos promedios anuales para Copacabana (1973-87) y Oruro (1973-87). Ambas estaciones son características una del microclima del Titicaca y otro del Altiplano central. El promedio para Oruro es de -0.63°C con una fluctuación máxima entre $(-17.0^{\circ}\text{C}) - (+9.0^{\circ}\text{C})$. Mientras que para Copacabana, a orillas del lago, el promedio de $+3.87^{\circ}\text{C}$ y una fluctuación entre $(-2.8^{\circ}\text{C})-(+10.0^{\circ}\text{C})$.

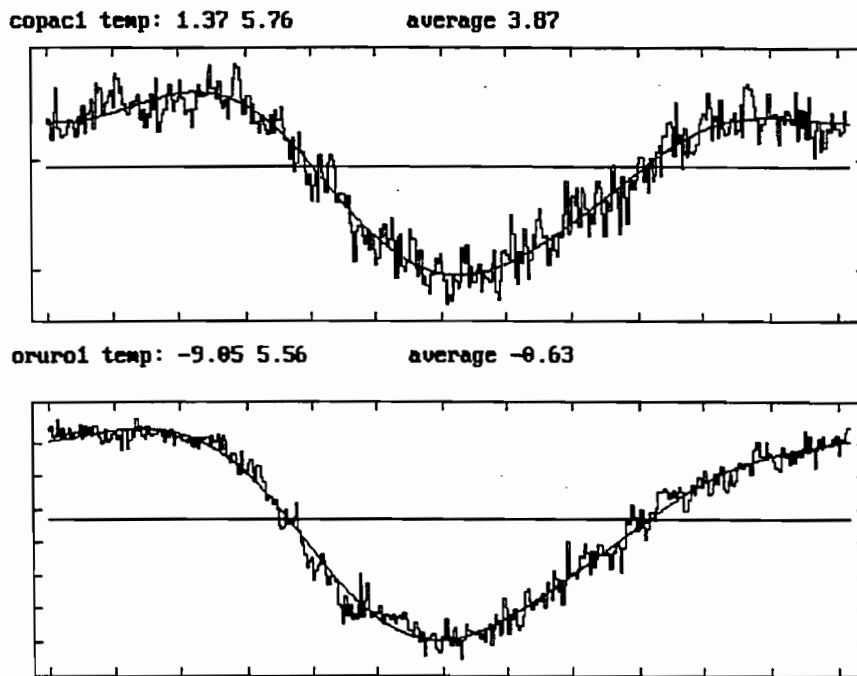


Fig. 8 Promedio de 15 años de los valores diarios de la estación de Copacabana y Oruro. La variación de dichas temperaturas van desde $+1.37^{\circ}\text{C}$ a $+5.76^{\circ}\text{C}$ y -9.05°C a $+5.56^{\circ}\text{C}$ respectivamente.

La curva continua en la Fig. 8 corresponde a un ajuste de una función armónica de periodo anual.

En la Tabla 1 se muestra varios valores de los parámetros armónicos ajustados mediante el análisis armónico. Estas estaciones están ordenadas de norte a sud. La estación de Copacabana, obviamente posee características muy diferentes que las otras. Charaña, cerca de la cordillera occidental, es la que posee un mínimo promedio de todas estas estaciones. Si bien uno puede intentar ajustar una regresión lineal a los promedios de esta tabla, empero, es más interesante observar el aumento de la primera armónica en función de la latitud de las estaciones. Las fases, se pueden considerar como constantes en cuanto a la primera armónica se refiere. Otra observación importante es el comportamiento relativamente constante de la segunda armónica.

TABLA I
Parámetros armónicos de estaciones del Altiplano Norte

	1a Armonica [°C]	2a Armónica [°C]	fase 1a Arm [días]	fase 2a Arm [días]	promedio [°C]
Copac. 1973-1987	1.490	0.574	17	94	3.87
Huarina 1977-1987	3.697	1.050	12	76	0.61
El Belén 1974-1977	3.428	1.482	20	76	0.38
Tihuanacu 1973-1982	4.823	0.989	08	72	-0.10
Viacha 1973-1982	4.829	1.333	07	83	-0.05
El Alto 1973-1987	3.524	0.669	14	87	0.68
Charaña 1973-1986	5.094	1.255	19	69	-5.46
Calacoto 1975-1987	5.714	1.075	15	73	-1.61

6. El Espectro Continuo de fluctuaciones

Se observa en la Fig. 9 la potencia espectral de la serie temporal de la estación de Copacabana que muestra además de las fluctuaciones anuales y sus armónicas, las oscilaciones de un período cualquiera. Nótese el pico correspondiente a una oscilación mas o menos mensual, que está ausente en otros espectros calculados para el altiplano norte. Consideramos que esta fluctuación puede estar correlacionado con las oscilaciones de los niveles de agua del Titicaca. Obviamente que hay que comprobar esta hipótesis. Un análisis somero de las oscilaciones del nivel del Titicaca podría dar un resultado en este sentido.

copac1 psd : 325.97 5.495e+006

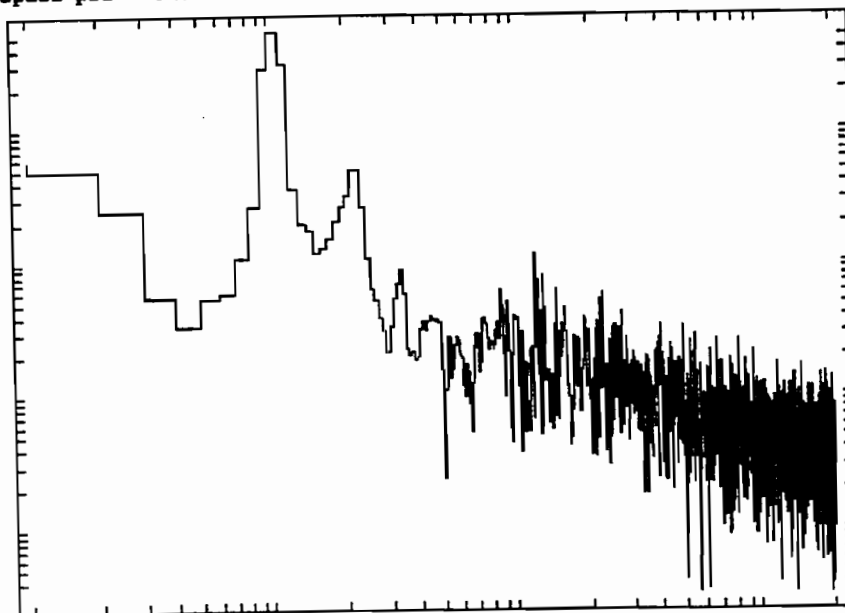


Fig. 9 Análisis espectral, Espectro de Potencias, de las temperaturas mínimas de la estación de Copacabana.

La forma del espectro es característico para esta estación comparativamente a las de otras estaciones del altiplano norte. Observe el pico de la frecuencia de ondas con periodo de aproximadamente un mes (lunar). Puede indicar una correlación con las oscilaciones (mareas ?) de la superficie libre del Lago Sagrado.

7. Conclusiones

Este es el primer intento de caracterizar el clima altiplánico, suponiendo que posea parámetros propios diferentes a otras regiones andinas. Las referencias en la bibliografía asumen casi siempre que el clima altiplánico es andino por autonomasia. Trabajos como el presente darán una pauta sobre esta dialéctica.

Existe, una variación neta de las amplitudes anuales de las temperaturas mínimas de las estaciones del altiplano en función de la latitud geográfica. Creemos que es un resultado nuevo y que vale la pena buscar variaciones similares con otros parámetros meteorológicos. Las fases del máximo de esta variación anual está prácticamente el 14 de enero.

Desde el punto de vista de la gerencia de datos meteorológicos no está claro si la diferencia de series temporales obtenidos por dos estaciones meteorológicas diferentes reflejan la diferencia de métodos de cada estación o bien son reflejos de un microclima real existente en miniregiones altiplánicas. Es de esperar que un diálogo abierto entre las instituciones sea la norma en el futuro para dilucidar esta paradoja.



MINISTERIO DE DESARROLLO SOSTENIBLE Y PLANIFICACION
SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGIA E HIDROLOGIA

SEMINARIO EL FENOMENO DE EL NIÑO EN BOLIVIA EVALUACION, BALANCE Y PERSPECTIVAS



DIRECCION GENERAL DE PLANIFICACION Y ORDENAMIENTO TERRITORIAL - INE - ALT - SENADECI
GOBIERNO MUNICIPAL DE LA CIUDAD DE LA PAZ
FACULTAD DE AGRONOMIA UMSA
SINSAAT

3, 4 Y 5 DE JUNIO DE 1998
LA PAZ - BOLIVIA

**SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGIA
E HIDROLOGIA
DEPARTAMENTO DE METEOROLOGIA**

SEMINARIO

**EL FENOMENO EL NIÑO EN BOLIVIA
EVALUACION
BALANCE Y PERSPECTIVAS**

COORDINADOR:

**REYNALDO MALDONADO R.
METEOROLOGO
JEFE DE DEPARTAMENTO**

ORGANIZADOR:

**HUBERT GALLARDO C.
METEOROLOGO
JEFE DE DIVISION**

PRESENTACION

En 1997-1998 Bolivia experimentó nuevamente los efectos del fenómeno El Niño. En esta oportunidad se desarrollaron una serie de actividades orientadas hacia la previsión y mitigación de sus efectos que han puesto a prueba tanto los conocimientos disponibles como las instituciones encargadas de hacer frente a tales eventos.

Pero mas allá de la necesaria acción inmediata, este episodio climático a constituido la oportunidad para proceder a un balance científico sobre las variaciones del clima en Bolivia y sobre la capacidad institucional del país para enfrentar los riesgos correspondientes.

En este sentido, con el apoyo de la Organización Meteorológica Mundial (O.M.M.)y del IRD (Ex ORSTOM) de la cooperación francesa, el SENAMHI y la Dirección General de Ordenamiento Territorial del Ministerio de Desarrollo Sostenible y Planificación han organizado del 3 al 5 de junio de 1998 en La Paz, un taller cuyos resultados están plasmados en la presente publicación.

Tanto la diversidad de los temas tratados como la calidad de los textos proporcionados, permiten afirmar, sin lugar a dudas, que se trata de un aporte de suma importancia para fundamentar las estrategias de desarrollo sostenible de Bolivia.

Ing. Carlos Díaz
DIRECTOR NACIONAL SENAMHI

Dr. Daniel Dory
DIRECTOR GENERAL DE PLANIFICACION
Y ORDENAMIENTO TERRITORIAL
MINISTERIO DE DESARROLLO SOTENIBLE Y PLANIFICACION

Dr. Bernard Pouyaud
DIRECTOR DEL IRD