

REGIMEN ESPACIAL Y TEMPORAL DE LAS PRECIPITACIONES EN LA CUENCA DE LA PAZ

Edson Ramírez, Javier Mendoza **, Edgar Salas *, Pierre Ribstein ****

Resumen

El presente artículo muestra los resultados de un análisis de series históricas (la del pluviógrafo de San Calixto, en la cuenca de La Paz) a diferentes grados de discretización temporal, que van desde el nivel anual hasta el horario, incluyendo un análisis de precipitaciones extremas. Este estudio permite la determinación de coeficientes de discretización de precipitaciones diarias para transformarlas en horarias. En una segunda parte, en la cuenca se analiza un grupo selecto de tormentas con el objeto de establecer tendencias sobre la variabilidad espacial de la precipitación en La Paz, realizándose al final un análisis de la relación existente entre variables topográficas de la cuenca (altitud, orientación y distancia a la cadena montañosa) con los valores de precipitación anual media definiendo de esta manera, la influencia del relieve sobre la variabilidad de las precipitaciones.

Palabras claves: *Índice de discretización horaria, correlogramas, variogramas, distancia de descorrelación.*

RÉGIME SPATIO-TEMPOREL DES PRÉCIPITATIONS DANS LE BASSIN DE LA PAZ

Résumé

Cet article présente les résultats de l'analyse de séries historiques (celle du pluviographe de La Paz - San Calixto) à différents degrés de discrétisation horaire, qui va du niveau horaire, incluant une analyse des précipitation extrêmes. Cette étude permet de déterminer des coefficients de discrétisation de précipitations journalières pour les transformer en horaires. Dans la deuxième partie, on analyse dans le bassin un groupe sélectionné d'orages dans le but d'établir des tendances de la variabilité spatiale des précipitations à La Paz, en réalisant pour terminer une analyse de la relation existant entre les variables topographiques du bassin (altitude, orientation et distance à la chaîne de montagne) et la valeur des précipitations annuelles moyenne, définissant de cette manière l'influence du relief sur la variabilité des précipitations.

Mots-clés : *Indice de discrétisation horaire, corrélogrammes, variogrammes, distance de décorrélation.*

SPATIAL AND TIME VARIABILITY OF THE PRECIPITATION REGIME IN THE LA PAZ BASIN

Abstract

The results from an analysis of an hystoric series (San Calixto's pluviograph in La Paz basin) shows a different degrees of time discretization, from anual to hour level, including the analysis of

* Instituto de Hidráulica e Hidrología (IHH-UMSA), CP 699 La Paz, Bolivia

** Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), CP 10993 La Paz, Bolivia

*** Misión ORSTOM, CP 9214 La Paz, Bolivia.

extreme precipitation. This study allows the determination of coefficients of discretization of daily precipitation to transform them in hourly precipitations. In a second part, a select group of storms is analysed in order to establish tendencies on the spatial variability of precipitations in the basin. Finally, an analysis of the relation between topographic variables of the basin (altitude, orientation and distance to the mountainous chain) and the values of the relief over the precipitation variability.

Key words: *Coefficient of discretization, correlogram, variogram, descorrelation distance.*

1. MARCO GEOGRÁFICO

La cuenca del río La Paz (Fig. 1) forma parte como subcuenca de la cuenca amazónica y es del tipo exorreica.

La cuenca del río La Paz, por encontrarse en el Altiplano boliviano y colindante a la Cordillera Oriental, presenta características muy especiales en su régimen de precipitaciones tanto a nivel temporal como a nivel espacial, a consecuencia de su conformación orográfica principalmente. Se encuentra ubicada al N.E. del altiplano boliviano, al pie de la cordillera Oriental, extendiéndose sobre una superficie de 508 km², hasta el punto de control ubicado en la estación hidrométrica de Aranjuez (Ahenke, 1992). Los principales ríos que drenan la cuenca son: el río Choqueyapu, el río Orkojahuirá, el río Irpavi y el río Achumani. Topográficamente el valle de la cuenca del río La Paz presenta una orientación Norte-Sur, separada por cordones montañosos, alcanzando en su parte más elevada una altitud de 5 392 m.s.n.m. y en su parte más baja a la salida en Aranjuez una altitud de 3 175 m.s.n.m. El río principal de la misma es el Choqueyapu, que nace en las faldas del nevado Chacaltaya; este río tiene una longitud aproximada de 35 km hasta la salida en el punto de control, dando lugar a que la cuenca tenga una pendiente promedio de 7% que caracteriza la predominancia de una topografía de cabecera de valle.

2. VARIABILIDAD TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN

Para este estudio se empleó la información del Observatorio de San Calixto que cuenta con información desde principios de siglo. El análisis se realizó a diferentes niveles de discretización, desde el anual hasta el horario.

La figura 1 muestra las isohietas medias anuales para el período 1976-1991 cada 20 mm de lluvia. La distribución espacial a nivel anual presenta un crecimiento gradual de la precipitación en el sentido sur-norte.

2. 1. Nivel anual y mensual

Se considera el año hidrológico de octubre a septiembre. Para la serie anual de la estación de San Calixto se encontró que para 70 datos analizados en el período 1920-1991 se tiene una media de 571 mm, una desviación standard de 95 mm y un sesgo de -0,103, lo que indica que se tiene un ligero sesgo a la izquierda.

Se ha encontrado que para la estación de San Calixto existe una acentuada variabilidad de la precipitación anual para el período analizado tal como se observa en la figura 2, donde además se indican con líneas segmentadas el valor de la precipitación media y los valores de la misma más y menos la desviación standard.

- 101 San Calixto
- 111 Aasana
- 131 Laikakhota
- 141 Incachaca
- 161 Hampaturi
- 181 Palcoma
- 185 Achachucala
- 191 Chucaru
- 121 Millipunku
- 195 Achumaru
- 202 Mallasa
- 205 Chuquaguillo
- 211 V. Copacabana
- 217 Puente Negro
- 218 Huayna Potosí
- 219 Alto Obrajes
- 223 Alto Achachucala
- 225 Achocalla
- 233 Vino Tinto
- 236 Plaza Villaroel
- 240 Alto Seguencoma
- 244 El Tejar
- 245 Villa Adela
- 247 V. Nueva Pasankeri
- 259 Río Seco
- 266 SENAMHI Central

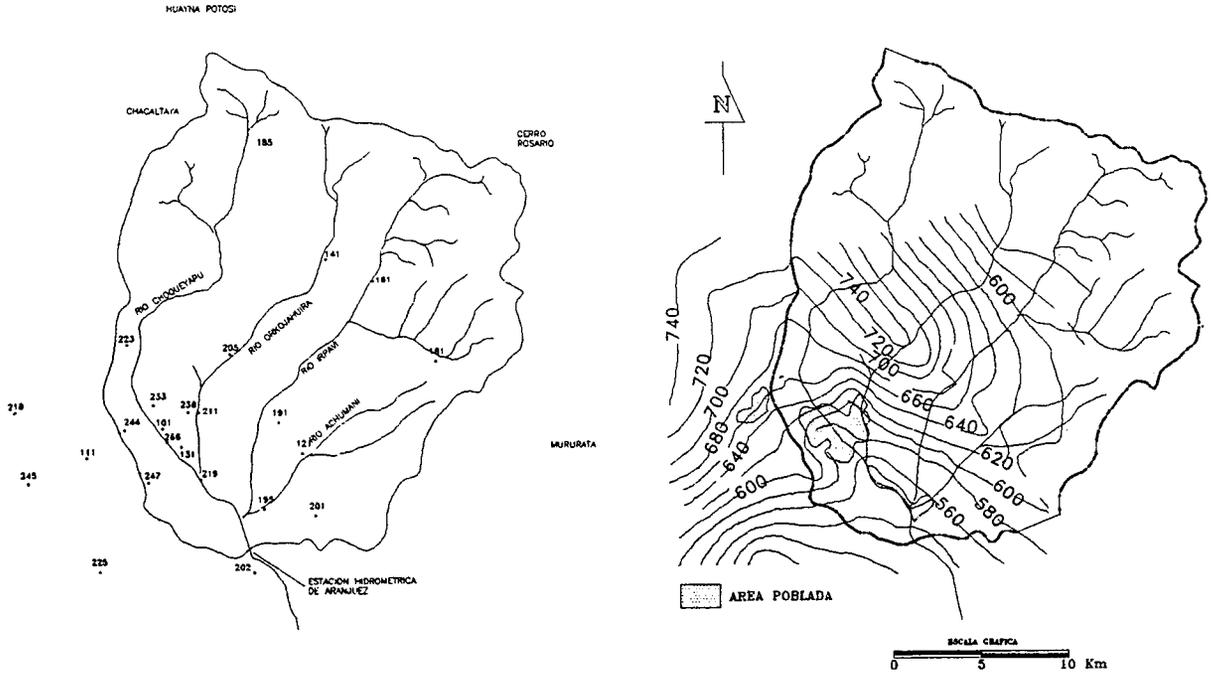


Fig. 1 - Cuenca del río La Paz, código de estaciones e isohietas (período 1976-1991).

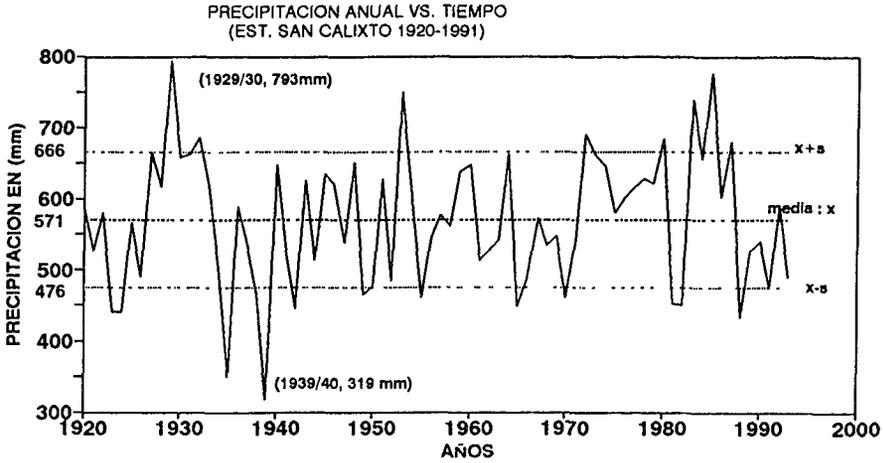


Fig. 2 - Precipitación anual vs. tiempo (San Calixto 1920-1991).

Se tiene por otra parte que a nivel mensual, el mes de enero es el más lluvioso y los meses de junio y julio los más secos. La época de lluvias empieza en octubre y la época seca en abril; dentro de la época de lluvias los meses de diciembre, enero, febrero y marzo son los más lluviosos aportando en promedio alrededor del 67% de la precipitación anual. En la época seca los meses de mayo, junio, julio y agosto son los más secos aportando en promedio alrededor del 8% de la precipitación total anual, tal como se observa en la figura 3, la cual muestra la distribución mensual de la precipitación en la estación de San Calixto para el período 1920-1991.

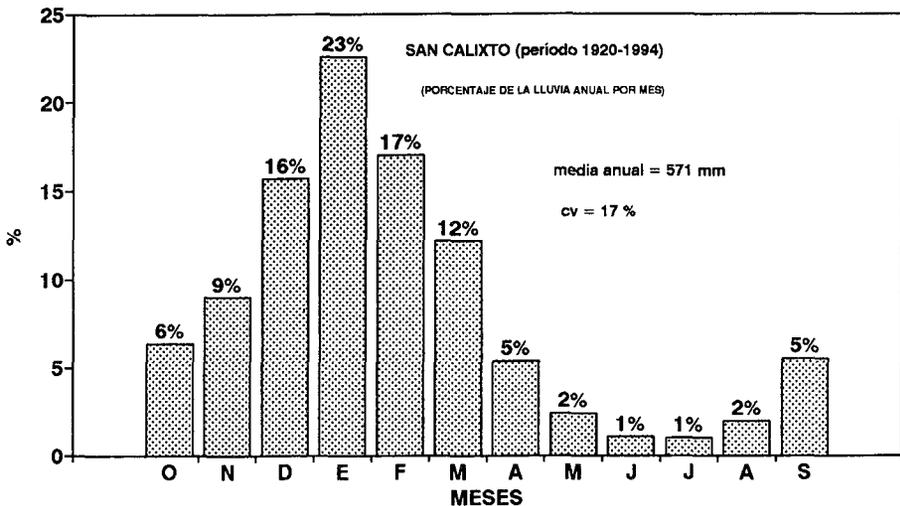


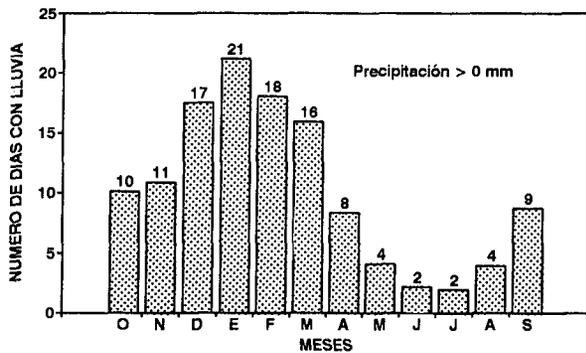
Fig. 3 - Distribución mensual de la lluvia en San Calixto (período 1920-1991).

2. 2. Nivel diario (estación de San Calixto)

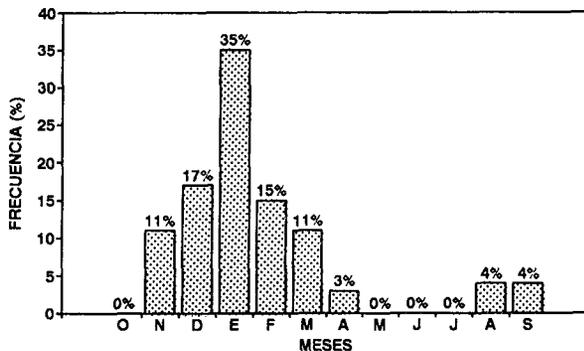
Los resultados encontrados se muestran en la figura 4 donde se observa: (a) el número de días de lluvia por mes para el período 1920-1991. Esta gráfica es característica del régimen pluviométrico estacional que presenta la cuenca, siendo el mes de enero, en promedio, el mes con mayor número de días de lluvia y los meses de junio y julio con menor número de días con lluvia.

En la figura 4(b) se observa en cada mes la frecuencia con la que se presentan las precipitaciones diarias máximas anuales. El mes de enero presenta un 35% de frecuencia, es el mes en que se produjeron la mayor cantidad de precipitaciones máximas y los meses de mayo, junio, julio y octubre los meses en que no se registró ninguna precipitación diaria máxima. La máxima precipitación diaria producida durante el período observado en la estación San Calixto fue la del 28 de diciembre de 1976 con 50,1 mm.

Realizando el test de ajuste probabilístico a cuatro funciones de probabilidad, se escogió la ley de Gumbel (Benjamín & Cornell, 1981) para el ajuste de la serie de precipitaciones



(a)



(b)

Fig. 4 - a) Número de días lluvia y b) Frecuencia con la que se presentan las precipitaciones máximas anuales en cada mes en San Calixto (período 1920-1991).

diarias máximas anuales. De este ajuste se obtuvieron los valores de precipitación máxima para períodos de retorno de 10, 50, 100 y 500 años respectivamente los cuales se muestran a continuación: $x_{10}=39,9$ mm, $x_{50}=49,4$ mm, $x_{100}=53,4$ mm y $x_{500}=63,0$ mm.

2. 3. Nivel horario (estación San Calixto)

En esta sección se presenta la expresión (índice de discretización horaria), deducida para la información pluviográfica de la estación de San Calixto, que relaciona la precipitación para una duración cualquiera P_d con la precipitación del pluviómetro (precipitación de 24 h) P_{24} . El análisis y selección de cerca a 150 tormentas registradas por el pluviógrafo de San Calixto en el período 1960-1991 (Mendoza, 1994), ha permitido obtener una función que relaciona el índice de discretización horaria P_d/P_{24} con el período de retorno T y la duración d . La mencionada función permite estimar las máximas precipitaciones para duraciones menores a la de 24 h, a partir del dato diario de precipitación. Si bien la función ha sido desarrollada con la información pluviográfica de la estación de San Calixto, puede ser utilizada para discretizar precipitaciones diarias en otras estaciones de la cuenca. La figura 5 (a) muestra las curvas obtenidas a partir de la referida función, para diferentes períodos de retorno. En ella se muestra asimismo la función resultante del análisis realizado.

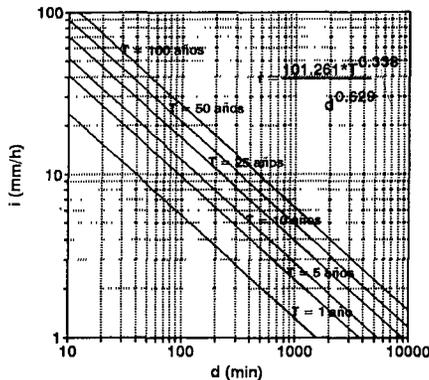
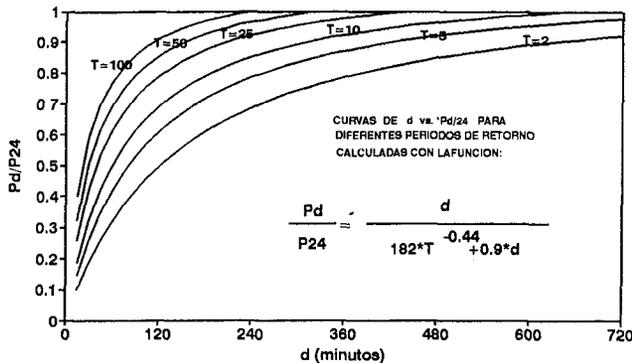


Fig. 5 - a) Curvas P_d/P_{24} vs. duración d para diferentes períodos de retorno (San Calixto), b) Curvas intensidad - duración - frecuencia, San Calixto (período 1960-1991).

Con la información pluviográfica de la estación de San Calixto, para el período 1960-1991, se determinaron las curvas intensidad, duración y frecuencia IDF, expresadas a través de la siguiente ecuación (Mendoza, 1994):

$$i = (101,261 * T^{0,338}) / (d^{0,629})$$

donde: i intensidad en (mm h-1), T período de retorno (años), d duración (min)

3. VARIABILIDAD ESPACIAL DE LA PRECIPITACIÓN

Para el estudio de la variabilidad espacial, la metodología empleada partió con la extracción de la información básica a través de la base de datos pluviométricos y pluviográficos creada mediante el paquete PLUVIOM de la ORSTOM, consistente en tormentas registradas que alcanzaron valores mayores o iguales a los 30 mm en 24 h (pluviometría) al menos en una cantidad mínima de pluviómetros. De esta forma se seleccionaron 20 eventos extremos, cada uno con información de alrededor de 30 pluviómetros dispuestos sobre la cuenca y alrededor de la misma.

Posteriormente se realizó una complementación de la información con mapas sinópticos y registros de superficie obtenidos principalmente de la estación meteorológica del aeropuerto de la ciudad de La Paz (AASANA-El Alto).

3. 1. Movimiento de las masas de aire húmedo

Interesantes estudios se realizaron relacionados a las masas de aire que circulan por el territorio boliviano principalmente en el oriente (Ronchail, 1986), pero poco se estudió sobre las masas de aire húmedo que se presentan en el Altiplano, especialmente en la cuenca del río La Paz; sin embargo, se utilizó la misma clasificación de situaciones meteorológicas empleada por Ronchail en sus estudios, considerando como base de la clasificación la distribución y forma de las zonas de baja presión y las de alta presión atmosférica (anticiclones) que se producen sobre Bolivia.

De los 20 eventos extremos seleccionados (Ramírez, 1995), se encontró información referente a mapas sinópticos de únicamente 15 eventos, distribuidos de la siguiente manera: DatAat (5), VDat (1), Dat (4), VDanAat (1), Dan (2), DanDat (1), DatApn (1). Este análisis muestra que la situación meteorológica Depresión Atlántica (Dat) que se caracteriza por la presencia de una zona de baja presión en el Atlántico y otra sobre territorio boliviano con la presencia de un frente que une ambas zonas, se presenta en la mayoría de los casos. Por otra parte, de estos mismos mapas sinópticos, se observó que cuando se presenta un evento extremo en La Paz, ocurre similar situación en el resto del continente, lo que muestra que un evento de este tipo es un fenómeno generalizado de tipo regional vinculado a efectos del tipo frontal.

Para conocer el comportamiento de las masas de aire a nivel de la cuenca de estudio, se analizaron tres estaciones meteorológicas en especial: AASANA-El Alto, San Calixto y Central La Paz, las cuales son las únicas en la cuenca de La Paz que cuentan con registros sobre direcciones de viento. Este análisis se lo realizó en función a que a lo largo del estudio se observó que existían comportamientos diferentes entre AASANA (El Alto) y San Calixto (ciudad de La Paz). Realizando una comparación entre los valores de dirección de viento y cantidad de precipitación se encontró que en los eventos en los que se registró mayor

precipitación en AASANA y menor en el centro de la ciudad, existía una combinación predominante de las direcciones de viento de N para AASANA y SE para San Calixto. En los eventos en que se presentaban menores precipitaciones en AASANA y mayores en el centro de la ciudad (San Calixto), se apreció una predominancia de vientos con la combinación de E para AASANA y SE para San Calixto. De este último caso se considera que los eventos que afectan de manera uniforme a toda la cuenca tienen una predominancia de vientos que provienen del este. Por otra parte, un detalle interesante encontrado, fue que en el caso de eventos extremos, las precipitaciones tienen un recorrido sur a norte y en el caso de precipitaciones de más baja magnitud, su recorrido es de norte a sur, es decir, desde la parte alta de la cuenca a la parte baja.

3. 2. Correlogramas

Para tener una idea de la variabilidad de la lluvia se utilizó el correlograma, el cual muestra el coeficiente de correlación existente entre estaciones respecto a la variable distancia. Para la construcción de estos correlogramas se empleó la ecuación lineal de correlación simple, observándose una distancia de descorrelación entre estaciones alrededor de los 9 a 10 km (Fig. 6a). Se entiende como distancia de descorrelación a la distancia hasta la cual una estación tiene representatividad.

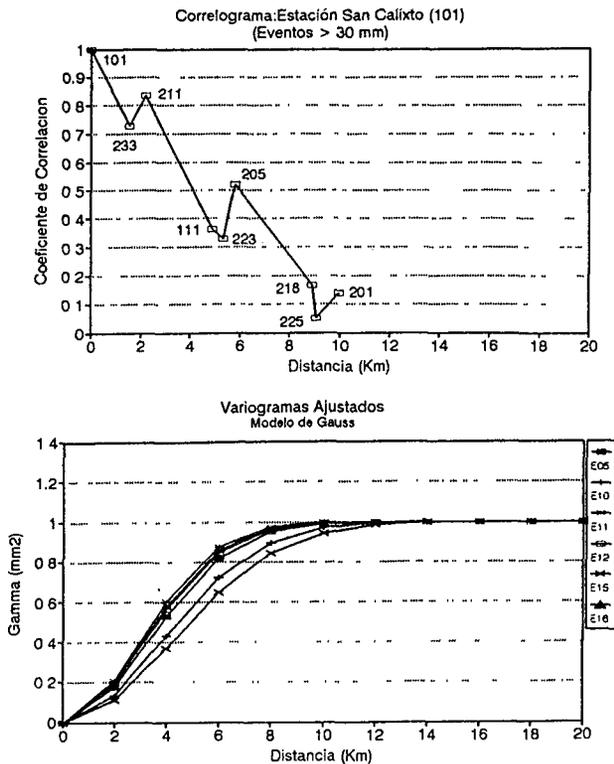


Fig. 6 - a) Correlograma para la estación San Calixto b) Variogramas ajustados para varios eventos en la cuenca de La Paz.

3. 3. Variogramas

Los variogramas permiten relacionar los valores de varianza de estimación de un grupo de datos observados en función a una variable que corresponde a la distancia. De manera similar a los correlogramas, los variogramas permiten estimar el grado de representatividad de las estaciones en el espacio y obtener la mencionada distancia de descorrelación (punto en el cual la curva se estabiliza).

La ventaja de los variogramas es que éstos pueden ser ajustados a modelos matemáticos preestablecidos, los cuales son empleados en el proceso de regionalización para la posterior obtención de campos de precipitación permitiendo relacionar a cada punto de una malla, una varianza de estimación.

De los 20 eventos seleccionados, se construyeron sus respectivos variogramas y se escogieron aquellos que presentaron mayor confiabilidad por la calidad de su información.

Para la elección del modelo más adecuado se empleó el denominado "test de validación cruzada" que consiste en ir calculando el valor teórico de un punto en el espacio mediante el modelo elegido sin considerar el valor observado del punto en cuestión y compararlos entre sí de tal forma de ir determinando sus errores en la estimación. Este tipo de validación al igual que la modelación de los variogramas, se realizó empleando el paquete GEOSTAT de la ORSTOM (Boivin, 1990) a través del cual se encontró que el modelo que mejor se ajustaba a los eventos seleccionados fue el de Gauss, cuya ecuación tiene la forma:

$$G(h) = w[1 - e^{-(h/a)^2}]$$

De acuerdo a este modelo, se ha encontrado que la distancia de descorrelación se encuentra entre los 9 y 10 km igual a lo encontrado en el estudio de los correlogramas (Fig. 6b). Para otras estaciones que la de San Calixto, se observa la misma distancia de descorrelación.

3. 4. Variables topográficas

Para conocer la relación del relieve con la precipitación, se construyeron gráficas de la precipitación media anual en función a variables topográficas como ser la altura, la distancia respecto al eje de la cordillera y la orientación de las subcuencas respecto a la dirección del viento predominante. Habiéndose encontrado que principalmente estos tres parámetros o variables, pueden ser consideradas como predictoras de la precipitación, observándose que a mayor altitud, mayor es la precipitación. De igual manera mientras más cerca se encuentra la estación del eje de la cordillera, mayor es la precipitación. Finalmente, mientras más paralela es la dirección del eje de la subcuenca respecto a la dirección de viento predominante (Este) en barlovento, mayor es la cantidad de precipitación.

Este análisis se basó en estudios realizados para varios continentes (Basist & Bell, 1994).

Con estos tres parámetros considerados como predictores de la precipitación, se realizó un análisis multivariable habiendo encontrado la siguiente expresión que provee un coeficiente de ajuste R^2 de 0,76 para 18 estaciones de análisis.

$$P = -164,2063 + 0,2421(ALT) + 0,3524(ORI) - 6,0457(EXP)$$

donde: P = precipitación media anual (mm)

ALT = altura de la estación (m.s.n.m.)

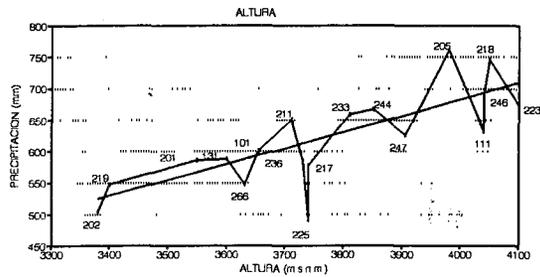
ORI = orientación del valle de la cuenca (grados)

EXP = distancia de la estación al eje de la cordillera (km)

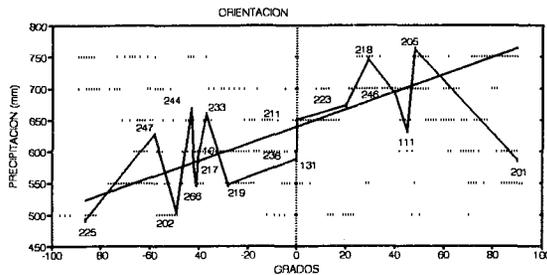
En los gráficos siguientes se observan la relación entre la precipitación y los parámetros topográficos seleccionados.

4. CONCLUSIONES

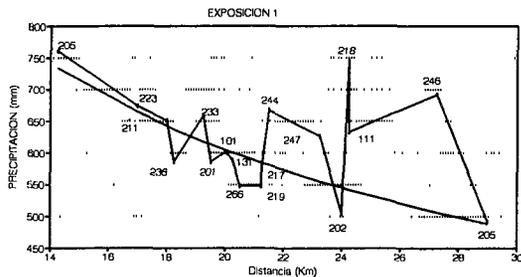
De acuerdo a los estudios realizados, se concluye que las precipitaciones que se producen al interior de la cuenca de La Paz, son producto de los rebalces de las masas húmedas que provienen de la Amazonía que logran atravesar la cordillera Oriental. Este efecto hace que las precipitaciones inviertan su gradiente una vez atravesada la cordillera, descargando su humedad a lo largo de su recorrido desde la parte alta de la cuenca hasta la salida de la misma, a menor altitud. El efecto orográfico es notorio por el hecho que debido a la orientación de las subcuencas y la disposición de ciertos picos nevados sobre la cordillera,



(a)



(b)



(c)

Fig. 7 - a) Precipitación vs. altura, b) Precipitación vs. orientación, c) Precipitación vs. exposición.

la cual sigue una orientación NE a SE (Fig. 7) induce a que se produzcan dos sectores pluviométricamente distintos los cuales son Choqueyapu-Orkojahuiria e Irpavi-Achumani a consecuencia de la forma en que estas masas húmedas de aire provenientes del Este (E) interceptan a la cadena montañosa.

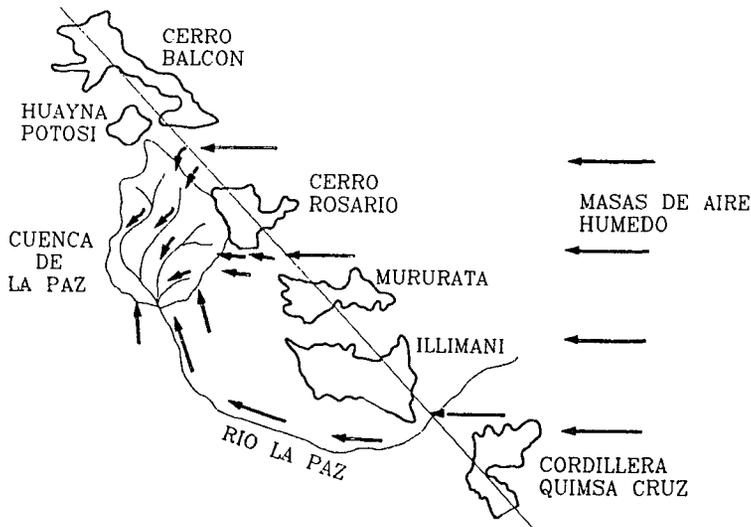


Fig. 8 - Forma en que se desplazan las masas húmedas de aire a través de la cordillera oriental y la definición de los dos sectores pluviométricos (Choqueyapu-Orkojahuiria e Irpavi-Achumani).

Referencias citadas

- AHENKE, J.L., 1992 - Test de diversos modelo matemáticos para análisis de crecidas aplicado a la cuenca del río La Paz. Tesis de Grado UMSA, Bolivia.
- BASIST, A. & BELL, G., 1994 - Statistical Relationships between Topography and Precipitation Patterns. *Journal of Climate*, Volume 7, september 1994: 1305-1315.
- BENJAMIN, J. & CORNELL, A., 1981 - *Probabilidad y Estadística en Ingeniería Civil*, 400p.
- BOIVIN, P., 1990 - *GEOSTAT-PC*. Logiciel Interacrif pour le calcul geostatistic, 68p., París : ORSTOM.
- MENDOZA, J., 1994 - Estudio del Régimen Pluviométrico en la cuenca del río La Paz, Tesis de Grado, Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia.
- RAMÍREZ, E., 1995 - Influencia del Relieve sobre la Variabilidad Espacial y Temporal de las precipitaciones: Cuenca del río La Paz, Tesis de Grado, Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia.
- RONCHAIL, J., 1986 - Situations atmosphériques et précipitations comparées sur l'Altiplano et l'Amazonie, Bolivie, 43p., La Paz: Publ. PHICAB.