

**UNIVERSIDAD DE CUENCA**  
**FACULTAD DE INGENIERIA**



**MAESTRÍA EN GEOMÁTICA ORIENTADA AL**  
**ORDENAMIENTO TERRITORIAL**

**TÍTULO:**

**ESTIMACION DE PRECIPITACION ESPACIAL MEDIANTE**  
**CORRELACION CON VARIABLES SECUNDARIAS Y LA**  
**AYUDA DE TECNOLOGIAS DE INFORMACION**  
**GEOGRAFICA**

**Proyecto de graduación previo a la obtención del**  
**Grado de Magister en Geomática**

**Autor:**

**Ing. Ivan Oswaldo Abad Encalada**

**Director:**

**Ing. Rolando Céleri Alvear, PHD**

**JULIO - 2014**

**CUENCA – ECUADOR**



## Resumen

Este estudio se centra en aplicar y validar 4 técnicas de interpolación espacial, Thiessen (TH), inverso de la distancia ponderada (IDW), kriging (KO) y cokriging (CK), a valores de datos mensuales y anuales de precipitación registrados en 23 estaciones de medición de la cuenca del río Paute en el sur de los Andes Ecuatorianos, así como buscar la variable topográfica que mejor se correlacione con la precipitación para ser usada como auxiliar de interpolación en la técnica cokriging, mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica y Geoestadística.

Se calcularon 76 variables topográficas, 50 fueron obtenidas del Modelo Digital de Elevaciones y 26 son productos escalares entre algunas de las primeras variables. Las variables presentaron valores muy pobres de correlación con la precipitación ( $r < 0.3$ ) o a lo sumo una correlación moderada ( $r < 0.6$ ) para 1-3 meses al año. Estas bajas correlaciones llevaron a buscar otras variables denominadas índices orográficos  $IO_1$  e  $IO_2$  definidos como expresiones que combinan elementos orográficos que son el efecto barrera de la cordillera y la ubicación en zona de valle o montaña de la estación estudiada.  $IO_1$  presenta muy buena correlación con la precipitación anual y mensual en el periodo mayo a septiembre ( $r > 0.91$ ), en tanto que  $IO_2$  da correlaciones aceptables ( $r > 0.56$ ) para los meses no explicados por  $IO_1$ .

La validación cruzada de los métodos de interpolación muestra que el mejor método para los meses enero, febrero, abril, octubre, noviembre y diciembre es CK, en tanto que para los demás meses y para la media anual es KO.

Palabras Clave: Precipitación, SIG, Geoestadística, Índice Orográfico



## Abstract

This study focuses on implementation and validation of four spatial interpolation techniques, Thiessen (TH), inverse distance weighted (IDW), kriging (KO) and cokriging (CK) at values of monthly and annual rainfall registered in 23 rain gauges of Paute River Basin in the southern Ecuadorian Andes, and seek topographic variable that best correlates with the precipitation to be used as auxiliary cokriging interpolation technique, using Geographic Information Systems (GIS) and geostatistics.

Seventy six topographic variables were calculated, of which 50 were obtained from Digital Elevation Model and 26 are scalar products between some of the first variables. The variables showed values very poor correlation with rainfall ( $r < 0.3$ ) or at most a moderate correlation ( $r < 0.6$ ) only for 1-3 months a year. These low correlations led to seek other variables called orographic indices  $IO_1$  and  $IO_2$  defined in this study as expressions that combine two orographic elements the barrier effect of the range and the location of studied gauge on area of mountain or valley.  $IO_1$  has very good correlation with the annual and monthly precipitation in the period May to September ( $r > 0.91$ ), while  $IO_2$  gives acceptable correlations ( $r > 0.56$ ) for the months not explained by  $IO_1$ .

Cross-validation of the interpolation methods shows that the best method for the months January, February, April, October, November and December is CK, while for the months March, May, June, July, August and September and the annual average is KO.

Keywords: Rainfall, GIS, Geostatistics, OrographicIndices



## Índice General

<b>Resumen</b>	<b>2</b>
<b>Abstract</b>	<b>3</b>
<b>Índice General</b>	<b>4</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>6</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>8</b>
<b>Glosario de Abreviaturas y Símbolos</b>	<b>10</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>15</b>
1.1 Objetivos	17
1.2 Marco teórico	17
<b>2 Materiales y Métodos</b>	<b>21</b>
2.1 Área de estudio	21
2.2 Datos	23
2.2.1 Datos de precipitación	23
2.2.2 Modelo digital de elevaciones	25
2.3 Métodos	26
2.3.1 Procesamiento de los datos pluviométricos	26
2.3.1.1 Regímenes de precipitación	32
2.3.1.2 Años normales y años extremos	33
2.3.1.3 Homogeneidad de los datos de las series mensuales	35
2.3.2 Procesamiento del modelo digital de elevaciones	37
2.3.3 Determinación de variables topográficas y correlación con la precipitación	39
2.3.4 Métodos de interpolación y su validación	42
2.3.4.1 Polígonos de Thiessen	42
2.3.4.2 IDW	43
2.3.4.3 Kriging Ordinario	44



2.3.4.4 Cokriging	50
2.3.4.5 Validación cruzada de los métodos	52
<b>3 Resultados y Discusión</b>	<b>56</b>
3.1 Relación entre la precipitación y variables secundarias derivadas de la topografía	56
3.2 Comparación de métodos de interpolación	78
3.2.1 Modelos de semivariogramas teóricos aplicados	78
3.2.2 Comparación de métodos de interpolación	81
<b>4 Conclusiones</b>	<b>102</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>108</b>
<b>Anexo A.</b> Diagramas de caja de series de datos mensuales de precipitación	<b>114</b>
<b>Anexo B.</b> Histogramas de series de datos mensuales de precipitación por estaciones	<b>126</b>
<b>Anexo C.</b> Histogramas mensuales de precipitación de estaciones de medición	<b>138</b>
<b>Anexo D.</b> Valores de precipitación en estaciones obtenidos por los métodos de interpolación en la validación cruzada	<b>145</b>



## Índice de Tablas

Tabla 2.1: Estaciones con datos de precipitación utilizadas	24
Tabla 2.2: Valores atípicos de datos mensuales de precipitación	28
Tabla 2.3: Regímenes de precipitación de las estaciones utilizadas	33
Tabla 2.4: Años normales, secos y húmedos de las estaciones	34
Tabla 2.5: Interpretación del coeficiente de correlación	36
Tabla 2.6: Coeficiente de correlación entre series datos mensuales con el valor medio mensual para el período 1975 – 1989	36
Tabla 3.1: Explicativo de las variables utilizadas	57
Tabla 3.2: Coeficiente de correlación (r) para precipitación y alturas	61
Tabla 3.3: Coeficiente de correlación (r) para precipitación y alturas en las 8 direcciones cardinales	62
Tabla 3.4: Coeficiente de correlación (r) para precipitación y rangos	62
Tabla 3.5: Coeficiente de correlación (r) para precipitación, pendiente y aspecto	63
Tabla 3.6: Coeficiente de correlación (r) para precipitación y orientación de las microcuencas	64
Tabla 3.7: Coeficiente de correlación (r) para precipitación y variables geográficas	64
Tabla 3.8: Coeficiente de correlación (r) para precipitación y otras variables topográficas	65
Tabla 3.9: Coeficiente de correlación (r) para precipitación y productos de variables derivadas de círculo radio 5 km	66
Tabla 3.10: Coeficiente de correlación (r) para precipitación y productos de variables derivadas de círculo radio 10 km	66
Tabla 3.11: Coeficiente de correlación (r) para precipitación y productos de variables derivadas de círculo radio 15 km	67
Tabla 3.12: Coeficiente de correlación (r) para precipitación y productos de variables derivadas de círculo radio 20 km	67
Tabla 3.13: Coeficiente de correlación (r) para precipitación y orientación y rango derivado de círculo radio 5 km	68
Ing. Ivan Oswaldo Abad Encalada	6



Tabla 3.14: Coeficiente de correlación (r) para $IO_1$ y precipitación	71
Tabla 3.15: Coeficiente de correlación (r) para $IO_2$ y precipitación	75
Tabla 3.16: Modelos teóricos de semivariogramas simples	80
Tabla 3.17: Modelos teóricos de semivariogramas simples y cruzados	80
Tabla 3.18: Valores de estadígrafos y determinación de potencia para mejor modelo de IDW	83
Tabla 3.19: Valores de precipitación media mensual sobre el área de estudio	84
Tabla 3.20: Valores de precipitación mínima mensual sobre el área de estudio	84
Tabla 3.21: Valores de precipitación máxima mensual sobre el área de estudio	85
Tabla 3.22: Valores de precipitación anual sobre el área de estudio	85
Tabla 3.23: Valores de ME	86
Tabla 3.24: Valores de RMS	87
Tabla 3.25: Valores de MAE (%)	87
Tabla 3.26: Valores de MS, RMSS Y ASE	88
Tabla 3.27: Valores de ME, RMS, MAE, MS, RMSS Y ASE para precipitación anual	88
Tabla 3.28: Precipitación media en C1	99
Tabla 3.29: Precipitación media en C2	99
Tabla 3.30: Precipitación media en C3	100
Tabla 3.31: Precipitación media en C4	100
Tabla 3.32: Precipitación media en C5	101



## Índice de Figuras

Figura 2.1: Localización de la Cuenca del Rio Paute.	22
Figura 2.2: Localización de estaciones con datos de precipitación en la Cuenca del Rio Paute.	25
Figura 2.3: Diagrama de caja de los datos de la estación M045	27
Figura 2.4: Histograma de precipitaciones mensuales del año 1982 de la estación M418	29
Figura 2.5: Histograma de precipitaciones mensuales del año 1982 de la estación M669	30
Figura 2.6: Histograma de precipitaciones mensuales del año 1988 de la estación M141	30
Figura 2.7: Histograma de precipitaciones mensuales del año 1984 de la estación M583	30
Figura 2.8: Histograma de precipitaciones mensuales del año 1975 de la estación M417.	31
Figura 2.9: Histograma de precipitaciones mensuales del año 1986 de la estación M414	31
Figura 2.10: Histograma de precipitaciones del mes de enero de las 23 Estaciones	35
Figura 2.11: Parámetros de modelos de semivariograma	47
Figura 3.1: Trapecio circular en dirección Este	69
Figura 3.2: Correlogramas precipitación vs $IO_1$ serie completa	72
Figura 3.3: Correlogramas precipitación vs $IO_1$ sin M206 y M207	73
Figura 3.4: Correlogramas precipitación vs $IO_2$ serie completa	76
Figura 3.5: Correlogramas precipitación vs $IO_2$ sin M206 Y M207	77
Figura 3.6: Mapas de interpolación de precipitación para el mes enero	90
Figura 3.7: Mapas de interpolación de precipitación mes febrero	91
Figura 3.8: Mapas de interpolación de precipitación mes marzo	91
Figura 3.9: Mapas de interpolación de precipitación mes abril	92
Figura 3.10: Mapas de interpolación de precipitación mes mayo	92
Ing. Ivan Oswaldo Abad Encalada	8



Figura 3.11: Mapas de interpolación de precipitación mes junio	93
Figura 3.12: Mapas de interpolación de precipitación mes julio	93
Figura 3.13: Mapas de interpolación de precipitación mes agosto	94
Figura 3.14: Mapas de interpolación de precipitación mes septiembre	94
Figura 3.15: Mapas de interpolación de precipitación mes octubre	95
Figura 3.16: Mapas de interpolación de precipitación mes noviembre	95
Figura 3.17: Mapas de interpolación de precipitación mes diciembre	96
Figura 3.18: Mapas de interpolación de precipitación media anual	96
Figura 3.19: Trazo de círculos que definen zonas de análisis	97



## Glosario de abreviaturas y símbolos

### Abreviaturas

AED	Análisis exploratorio de datos
ASE	Media del error estandarizado de kriging
BM	Bimodal
C1	Zona del callejón interandino con estaciones de medición
C2	Zona de la parte baja de la cuenca con estaciones
C3	Zona en la cordillera suroeste que no tienen estaciones
C4	Zona en la cordillera sureste que no tienen estaciones
C5	Zona en la cordillera noreste que no tienen estaciones
CK	Cokriging
DEM	Modelo digital de elevación
IO <sub>1</sub>	Índice Orográfico 1
IO <sub>2</sub>	Índice Orográfico 2
IDW	<i>InverseDistanceWeight</i> , peso del inverso de la distancia
IGM	Instituto Geográfico Militar del Ecuador
INAMHI	Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador
ITCZ	<i>Intertropical ConvergenceZone</i>
KO	Kriging ordinario
MAE	Media del error absoluto
ME	Media del error
MLC	Modelo lineal de correogionalización
MS	Media estandarizada del error
ms.n.m.	Metros sobre el nivel del mar
ORSTOM	<i>Institutfrançais de recherchecientifiquepour le développement en cooperation</i> , ahora <i>L'Institut de recherchepour le développement – IRD</i>
RIC	Rango intercuartil, $Q_{0.75} - Q_{0.25}$
RMS	Raíz Cuadrada de la Media del Error Cuadrado
RMSS	Raíz Cuadrada de la Media del Error Estandarizado
SIG	Sistemas de Información Geográfica
TH	Thiessen
UM	Unimodal
UTM	<i>Universal TransverseMercator</i> , proyección cartográfica transversa de Mercator
WGS84	<i>WorldGeodeticSystem 1984</i>



## Símbolos

$\alpha$	Dirección angular entre dos puntos en el método kriging
$\beta$	Potencia del peso en el método IDW
$\lambda_i$	Peso kriging para el valor del parámetro $Z(x_0)$
$\gamma(h)$	Semivariograma en el método kriging.
$\gamma(h,\alpha)$	Semivarianza en función de (h) y su dirección ( $\alpha$ )
$\mu(x)$	Parámetro de Lagrange en el método de kriging
$\gamma_{v1}(h)$	Semivariograma de la variable principal en el método cokriging
$\gamma_{v2}(h)$	Semivariograma de la variable auxiliar en el método cokriging
$\gamma_{v1v2}(h)$	Semivariograma cruzado entre las variables principal y auxiliar en el método cokriging
$\sigma_{xi}$	Error estándar de predicción en los métodos de validación cruzada
a	Rango del semivariograma
$a_i$	Pesos de las observaciones de la variable primaria con $i=1, 2, \dots, n_1$ en el método cokriging
$b_j$	Pesos de las observaciones de la variable auxiliar con $j=1, 2, \dots, n_2$ en el método cokriging
$C_0$	Efecto Pepita o <i>Nugget</i> del semivariograma
$C_1$	Meseta o <i>Sill</i> del semivariograma, ( $C_0 + C_1$ ) cuando existe <i>nugget</i> .
i	Índice para los puntos vecinos en el método IDW
j	Índice para el punto a ser estimado en el método IDW
h	Distancia entre dos puntos en el método kriging
$h_{ij}$	Distancia entre el punto (j) y puntos vecinos (i) en el método IDW
H_15_10EE	Altura media del trapecio circular (radios 15 y 10 km) en la dirección Este
H_5K	Altura media de un área definida por un círculo de radio 5 km
HCO	Altura media de la línea que une los picos de la cordillera Oriental en una longitud de 5 kilómetros
n	Número de puntos en los métodos de validación cruzada
$n_h$	Número de parejas de datos que se encuentran a una distancia h en el método cokriging
$N(h,\alpha)$	Número de pares de observación separado ( $h$ ) y $\alpha$ semivarianza
P10	Décimo percentil estadístico
P90	Nonagésimo percentil estadístico
$P_{out}$	Valor atípico.



$Q_{0.25}$	Primer cuartil estadístico
$Q_{0.75}$	Tercer cuartil estadístico
$r$	Coefficiente de correlación de Pearson
$r^2$	Coefficiente de determinación
$R_{5K}$	Rango (diferencia de alturas extremas) en un área definida por un círculo de radio 5 km
$Z_i$	Valor en el punto $i$ en el método IDW
$Z_{v1}(x_i)$	Variable primaria con $i=1, 2, \dots, n1$ en el método cokriging
$Z_{v2}(x_j)$	Variable auxiliar con $j=1, 2, \dots, n2$ en el método cokriging
$Z(x_0)$	Valor de los vecinos en el punto 0 en el método kriging
$Z(x_i)$	Variable aleatoria en la posición $x_i$ en el método de kriging
$Z_{xi} =$	Valor medido en el punto $x_i$ en los métodos de validación cruzada
$Z^*_j$	Valor estimado en el punto $j$ en el método IDW
$Z^*_{v1}(x_0)$	Predicción de la variable de interés en el punto $x_0$ no muestreado en el método cokriging.
$Z^*(x_0)$	Valor estimado en el punto 0 en el método kriging
$Z^*_{xi}$	Valor predicho en el punto $x_i$ en los métodos de validación cruzada



Universidad de Cuenca  
Clausula de propiedad intelectual

---

Yo, Ivan Oswaldo Abad Encalada, autor de la tesis "ESTIMACIÓN DE PRECIPITACIÓN ESPACIAL MEDIANTE CORRELACIÓN CON VARIABLES SECUNDARIAS Y LA AYUDA DE TECNOLOGIAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 8 de julio del 2014

Ivan Oswaldo Abad Encalada

C.I: 0301159067



Universidad de Cuenca  
Clausula de derechos de autor

---

Yo, Ivan Oswaldo Abad Encalada, autor de la tesis "ESTIMACIÓN DE PRECIPITACIÓN ESPACIAL MEDIANTE CORRELACIÓN CON VARIABLES SECUNDARIAS Y LA AYUDA DE TECNOLOGIAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA", reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Magister en Geomática. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor/a

Cuenca, 8 de julio del 2014

Ivan Oswaldo Abad Encalada

C.I: 0301159067



## Capítulo 1

### Introducción

El Clima es un tema diario y que involucra o afecta a todos los que habitamos el planeta Tierra. La precipitación es uno de los factores principales del ciclo hidrológico y su conocimiento es indispensable para los modelos de predicción del escurrimiento, estimación de áreas diferenciadas de precipitación, así como datos de entrada en modelos de cuencas, entre otros. La modelación de los patrones espaciales de la precipitación es relevante tanto para las ciencias de la atmósfera como para las de la tierra, en especial para la hidrología. La estimación de la cantidad y la distribución espacial de precipitación mensual y anual son las entradas críticas a una variedad de modelos hidrológicos y ecológicos (Daly, 1994). Debido a que la precipitación con frecuencia tiene una gran variabilidad en espacio y tiempo, como es el caso de la mayoría de la lluvia que cae sobre los Andes, no es tarea fácil realizar su estimación de manera que se identifique el patrón de su variabilidad espacial.

La estimación de la distribución espacial de precipitación usando datos de estaciones puntuales que miden valores de precipitación es uno de los problemas fundamentales de la hidrología. Este problema se vuelve más complejo cuando es baja la densidad de estaciones de medición y el área de estudio esté ubicado en zonas montañosas que por la influencia de los efectos orográficos hacen que la precipitación tenga una alta variabilidad espacial. Obtener estimaciones confiables es particularmente difícil cuando el área de cobertura de las estaciones circundantes es dispersa o cuando las características de la precipitación son muy variables con la ubicación. Esta situación ocurre con frecuencia en terrenos montañosos con pocas estaciones disponibles y en donde los efectos orográficos pueden ser grandes. (Hevesi, 1992)



Otro problema es la opción del método de interpolación. Hay muchas técnicas disponibles, como el IDW (*InverseDistanceWeight*, Peso del Inverso de la Distancia), splines, kriging, cokriging, entre otros, debiendo escogerse el método que dé los resultados más realistas. Todos estos métodos están incluidos en algoritmos de software que gestionan Sistemas de Información Geográfica (SIG o su acrónimo en inglés GIS).

Debido a la alta variabilidad de la lluvia en la zona interandina del Ecuador ha sido un tema pendiente la investigación de un mecanismo para generar mapas mensuales de precipitación que representen de una manera adecuada esta variabilidad, en función de las características topográficas de la zona. Normalmente la generación de lluvia espacial se realiza con el método más sencillo, pero se desconoce el impacto que esto tiene en la estimación de la lluvia espacial.

Con estos antecedentes, mediante el desarrollo de este trabajo **“ESTIMACION DE PRECIPITACION ESPACIAL MEDIANTE CORRELACION CON VARIABLES SECUNDARIAS Y LA AYUDA DE TECNOLOGIAS DE INFORMACION GEOGRAFICA”**, se pretende aplicar y validar técnicas de interpolación espacial a valores de datos de precipitación registrados en estaciones de medición de la cuenca del río Paute mediante el uso de herramientas robustas como son los Sistemas de Información Geográfica y la Geoestadística, que permitirán incorporar variables secundarias derivadas de la topografía para mejorar la interpolación. Se identificará los parámetros topográficos que tengan una estrecha correlación con los valores de precipitación y la técnica de interpolación geoestadística que mejor estime la precipitación mensual y anual sobre la cuenca del Río Paute.



## 1.1 Objetivos

### Objetivo general:

El objetivo general de este estudio es estimar la precipitación espacial mediante correlación con variables secundarias derivadas de la topografía, con la ayuda de tecnologías de información geográfica, en especial las técnicas de interpolación Geoestadística.

### Objetivos Específicos:

- Identificar los parámetros topográficos que tienen una estrecha correlación con los valores de precipitación mensual y anual en la cuenca del río Paute.
- Identificar la técnica de interpolación Geoestadística que mejor estima la precipitación mensual y anual sobre la cuenca del río Paute.

## 1.2 Marco Teórico

Muchos trabajos se han desarrollado para relacionar los valores de precipitación con variables topográficas y sinópticas de la zona de estudio, determinado la existencia de una estrecha relación entre estas características y la variabilidad espacial de la precipitación. Teniendo como ejemplos, entre otros, los realizados para las áreas de la Cuenca Great en California (Houghton, 1979), de la Montaña Yucca en Nevada (Hevesi, 1992), de la Región Oeste del Himalaya (Singh & Kumar, Effect of orography on precipitation in the western Himalayan region, 1997), de la Cuenca del río Animas en Colorado (Hay, Viger, & McCabe, 1998), de la Zona Mediterránea de España (Romero & al, 2003) y a nivel de mesoescala para 10 regiones del mundo (Basist, Bell, & Meentemeyer, 1994) y para el territorio de USA (Briggs & Cogley, 1996).



Con respecto al efecto de la altitud sobre la precipitación, muchos estudios se han desarrollado en las dos últimas décadas (Hevesi, 1992); (Daly, 1994); (Basist, Bell, & Meentemeyer, 1994); (Martínez, 1995); (Kyriakidis, Kim, & Miller, 2001); (Romero & al, 2003); (Guan, Wilson, & Makhnin, 2005) entre otros. Entre ellos, (Daly, 1994) determinó una relación lineal entre la precipitación y la altitud en Estados Unidos, y construyó un modelo extensamente aplicado que se llama PRISMA (*Precipitation- elevationRegressionsonIndependentSlopesModel*).

Además de la elevación o altitud, se han realizado muchos estudios para encontrar relaciones entre la precipitación y otras variables topográficas. Por ejemplo, cuando el área de estudio está cerca del Mar, la relación entre la precipitación y distancia hacia la costa es una variable considerada (Marquínez, Lastra, & García, 2003); (Portalés, Boronat, Pardo, & Balaguer, 2010). Para áreas de estudio localizadas en zonas montañosas, la relación entre la precipitación y factores como la elevación, pendiente, aspecto, distancia hacia la cordillera, son considerados (Konrad, 1995); (Hay, Viger, & McCabe, 1998); (Marquínez, Lastra, & García, 2003); (Guan, Wilson, & Makhnin, 2005); (Portalés, Boronat, Pardo, & Balaguer, 2010). Otras variables geográficas, como la latitud, la longitud, posición o acimut también han sido consideradas en algunos estudios (Ninyerola, Pons, & Roure, 2000); (Guan, Wilson, & Makhnin, 2005); (Portalés, Boronat, Pardo, & Balaguer, 2010).

Por otro lado, para obtener mapas o grillas regulares de datos de precipitación es necesario escoger un método apropiado para realizar la interpolación de los datos. Paralelamente a las investigaciones realizadas para encontrar una relación entre variables topográficas y la precipitación, también se han realizado muchos estudios sobre el tema de encontrar un adecuado método de interpolación de datos de precipitación.



Las técnicas dadas por la Geoestadística como kriging o cokriging han sido estudiadas en muchos trabajos como alternativas para desarrollar la interpolación espacial de la precipitación a partir de datos de estaciones puntuales de medición. Así por ejemplo (Tabios & Salas, 1985) hacen una comparación de los métodos para estimar precipitación concluyendo que la técnica kriging es superior a las otras técnicas analizadas. De igual manera el trabajo desarrollado por (Hevesi, 1992) concluye que kriging da mejores resultados con respecto a otros métodos de interpolación y que cokriging usando datos de altura como variable secundaria da mejores resultados que los métodos de regresión que usan solo datos de altura y métodos de interpolación que solo usan datos de precipitación. Trabajos realizados por (Pardo, 1998), (Jefferey, Carter, Moodie, & Beswick, 2001), (Kyriakidis, Kim, & Miller, 2001), (Guan, Wilson, & Makhnin, 2005), (Murthy & Abbaiah, 2007), (Portalés, Boronat, Pardo, & Balaguer, 2010) han utilizado técnicas geoestadísticas para estimar precipitación llegando a resultados satisfactorios.

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG o GIS) a más de tener algoritmos que sirven para obtener parámetros que definen características topográficas del terreno a partir de Modelos Digitales de Elevación (DEM), son herramientas que tienen algoritmos para aplicar técnicas de interpolación geoestadística. La modelación hidrológica distribuida, por citar un ejemplo, requiere una entrada de una gran base de datos y también de generar salidas espacialmente distribuidas; por eso los GIS son una herramienta muy utilizada en este campo por sus ventajas en el almacenamiento, visualización y manejo de datos (De Smedt & Liu, 2004). El estudio de fenómenos complejos como la precipitación demanda de herramientas capaces de analizar de manera satisfactoria las variables geográficas que intervienen en su ocurrencia y distribución. La geoestadística aplicada en plataformas robustas, como por ejemplo los sistemas de información geográfica, prometen ser una alternativa muy



positiva al estudiar dicho fenómeno (Guerra, Gómez, González, & Zambrano, 2006).

En ese estudio se investigarán las relaciones entre precipitación y variables topográficas y geográficas como la elevación, pendiente, aspecto, distancia a barreras montañosas, latitud, longitud para generar mapas espaciales de precipitación en la región interandina del Ecuador. La obtención de estas variables secundarias se realizará mediante un SIG y en base a un Modelo Digital de Elevaciones generado para este estudio a partir de la cartografía oficial del Instituto Geográfico Militar del Ecuador. Así mismo se estudiarán el método clásico de Thiessen y tres métodos de interpolación como es el caso del peso del inverso de la distancia IDW, kriging ordinario y cokriging, como interpoladores o estimadores para identificar el impacto de su uso sobre la generación de mapa espaciales de precipitación; los primeros tres métodos usan sólo información de precipitación, mientras el método cokriging usará a más de los datos de precipitación a la variable secundaria que mejor se correlacione con la precipitación como auxiliar de interpolación. El área de estudio escogida es la cuenca del río Paute debido a la alta cantidad de datos existentes.



## Capítulo 2

### Materiales y Métodos

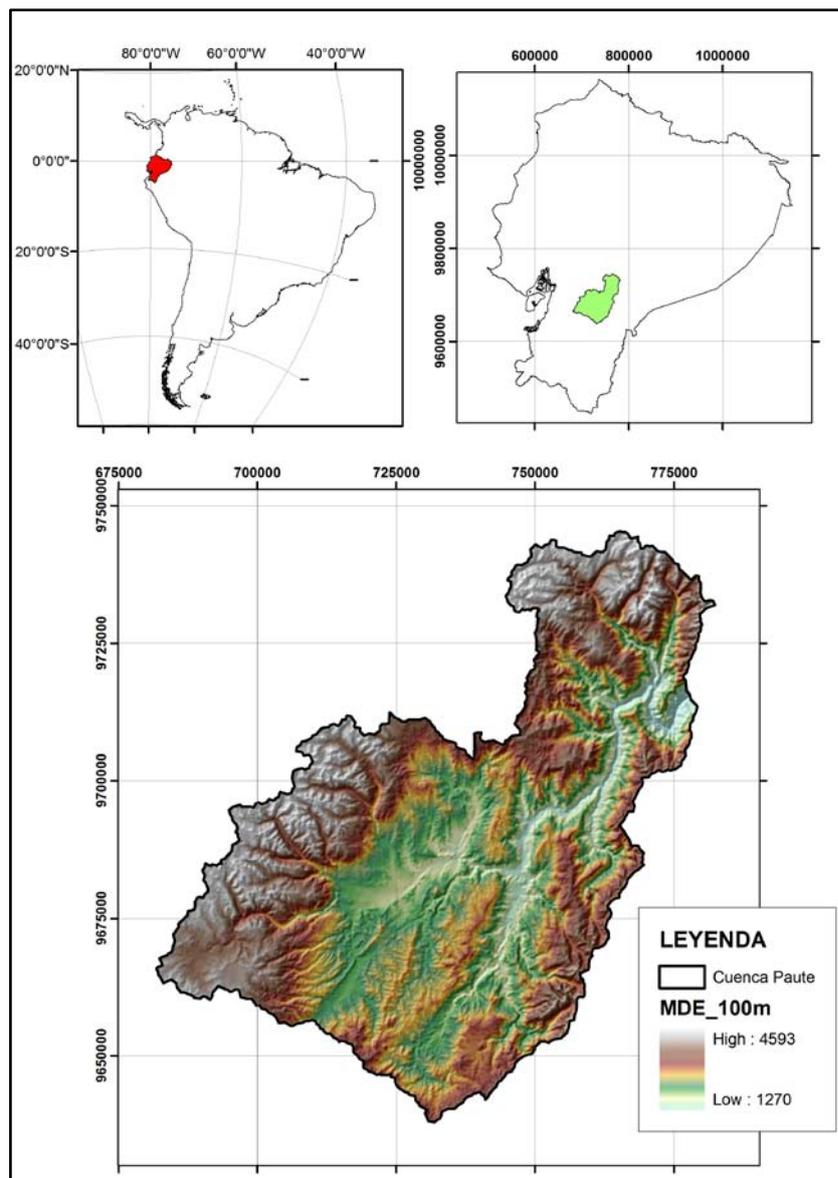
#### 2.1 Área de estudio

El área de estudio (Figura 2.1) corresponde a la porción de la cuenca del río Paute aguas arriba del sitio de emplazamiento del túnel de descarga de la central hidroeléctrica “Molino” que tiene una potencia instalada de 1100 MW. El punto de cierre de la cuenca de estudio está localizado a 1270 m s.n.m. y tiene un área de aporte de 5177 km<sup>2</sup> y un desnivel de 3323 m.

La cuenca del río Paute contiene una amplia gradiente en altitud (4250 - 550 m s.n.m.), por lo cual su régimen de precipitaciones es muy variado en intensidad y duración, teniendo promedios anuales de 2500 – 3400 mm en el extremo oriental de la cuenca y también la concurrencia de precipitaciones máximas de 1200 a 1500 en la línea de cumbres de la Cordillera Occidental. A su vez los promedios mínimos anuales de precipitaciones entre 600 – 800 mm se registran en los valles interandinos coincidiendo con los poblados de Cuenca, Azogues, Sigüig, Gualaceo, Paute y Guachapala. Con respecto a la temperatura, la cuenca cuenta con un rango de temperatura media multianual que va desde 4.4 a 18.6 °C. Este amplio rango de temperatura radica en su igualmente amplio gradiente de altitud. Las zonas de menor temperatura corresponden a las cumbres de las cordilleras Oriental y Occidental de los Andes con un promedio de temperatura de 6°C, en tanto las zonas más cálidas se encuentran en los valles interandinos antes descritos y en la parte oriental de la zona del subtrópico hacia la Amazonía, con promedios de 22 a 26°C (PACC, 2009).

A pesar de que las alturas en la cordillera Occidental son superiores a los 4000 m s.n.m., no hay la presencia de glaciares ni nieve cubriendo picos

montañosos en la cuenca, debido a la proximidad a la línea Ecuatorial que principalmente definen los regímenes de disponibilidad de agua y como resultado son clasificados en dos estaciones: lluviosa y seca. La ausencia de estaciones invernales con presencia de nieve es uno de los principales aspectos que diferencian a los Andes Tropicales de las cordilleras de climas templados como las Montañas Rocosas, los Pirineos o los Alpes (Céleri, 2007).



**Figura 2.1: Localización de la Cuenca del Río Paute, en el punto de cierre de la descarga de la Central Hidroeléctrica “Molino”. Las Coordenadas están en WGS84 y Proyección UTM.**



La cuenca está compuesta de varias subcuencas con áreas en el rango de 145 a 900 km<sup>2</sup>. La cuenca consiste en un modelo irregular de grandes cordilleras interceptadas por valles profundos, lo cual produce una topografía irregular y una variabilidad espacial y temporal en la distribución e intensidad de las lluvias. La distribución estacional de la lluvia tampoco es constante a lo largo de la cuenca, con estaciones que presentan distribuciones estacionales uni-modales y bi-modales. Este comportamiento complejo de la precipitación puede ser atribuido al hecho que la cordillera andina presenta una estrecha sección transversal en su paso a lo largo del Ecuador, midiendo aproximadamente 80 km en la cuenca del estudio. (Célleri, 2007)

## 2.2 Datos

### 2.2.1 Datos de precipitación

Se utilizará los datos de estaciones de medición de precipitación ubicadas en la cuenca del río Paute. Las estaciones son operadas por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) del Ecuador y los datos se obtuvieron a partir de los anuarios publicados por este Instituto. La base de datos utilizada en el estudio corresponde a la base de datos que fue analizada, depurada, rellena y utilizada por el Dr. Rolando Célleri Alvear en su Tesis ***“Rainfall variability and rainfall-runoff dynamics in the Paute River Basin – Southern Ecuadorian Andes”*** (Célleri R, 2007) para la obtención del grado de Doctor. Esta información corresponde a valores mensuales de precipitación de 23 estaciones (ver Tabla 2.1 y Figura 2.2) y para el período de los años 1975 a 1989.

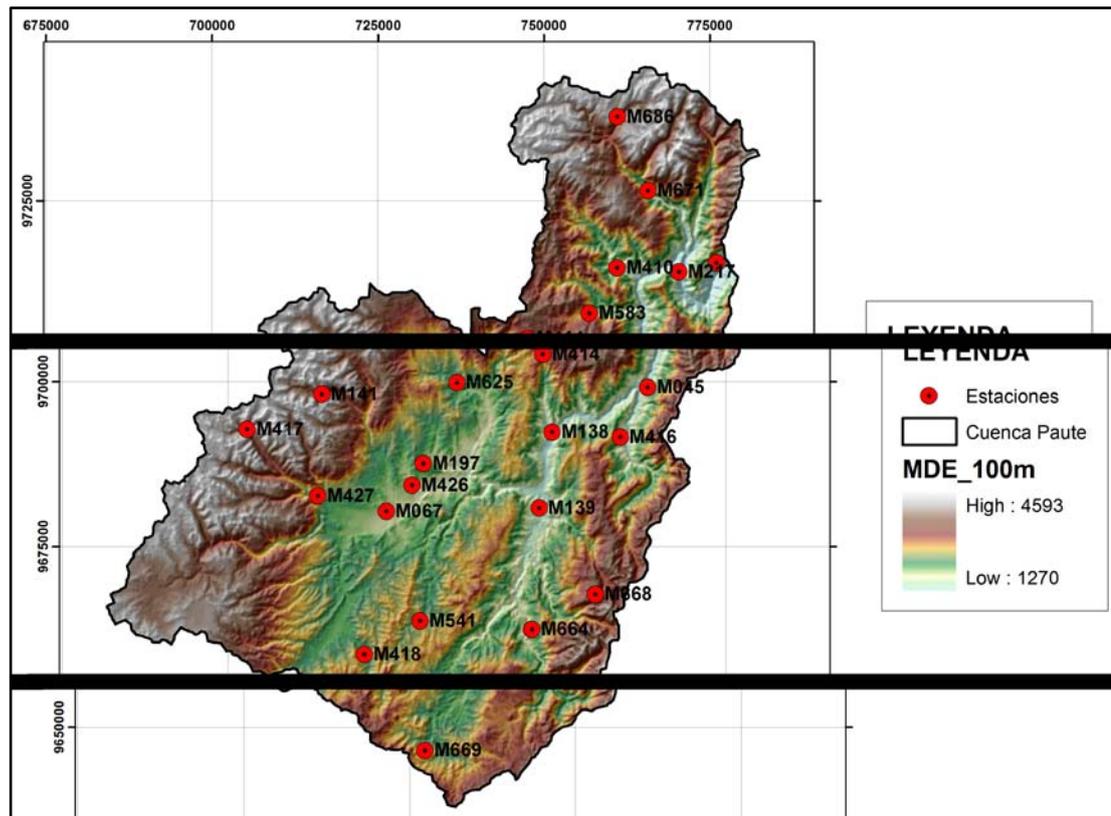
De acuerdo a (Célleri, 2007), el análisis de datos de precipitación estuvo enfocado a construir un banco de datos fiable mediante la aplicación de los siguientes pasos: la selección de estaciones que reúnen los requisitos



de calidad y el relleno de datos faltantes en las series. Los datos crudos fueron recuperados de 2 bases electrónicas de datos, de los cuales la primera base de datos se había construido específicamente para las estaciones de la Cuenca del Paute y la segunda base de datos es la llamada BIDRIE desarrollada por ORSTOM (*Institutfrançais de recherchecientifiquepour le développement en cooperation*, ahora *L'Institut de recherchepour le développement – IRD*) para el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador (INAMHI). El relleno de datos faltantes en las series fueron realizados por el método de regresión lineal simple y múltiple.

**Tabla 2.1: Estaciones con datos de precipitación utilizadas en este estudio**

CODIGO	ESTACION NOMBRE	COORDENADAS		ALTURA m s.n.m.
		ESTE	NORTE	
M045	Palmas - Azuay	763295	9699160	2412
M067	Cuenca Aeropuerto	723929	9680363	2528
M138	Paute	748909	9692396	2162
M139	Gualaceo	746941	9680851	2260
M141	El Labrado	714193	9698110	3424
M197	Jacarin	729503	9687609	2676
M206	Guarumales	776056	9715664	2109
M217	Penas Coloradas	770367	9714292	2192
M410	Rio Mazar Rivera	761067	9714929	2441
M414	Chanin	747511	9704167	3321
M416	El Pan	759142	9691635	2541
M417	PiscicolaChirimichay	702943	9692818	3503
M418	Cumbe	720609	9658680	2722
M426	Ricaurte Cuenca	727795	9684327	2437
M427	Sayausi	713613	9682692	2799
M541	CochapambaQuingeo	728992	9663741	2827
M583	Pindilig	756882	9708022	2912
M625	BiblianInecel	734530	9699888	2606
M664	SigsigInecel	745858	9662468	2613
M668	Mataglo Gulag	755411	9667769	3569
M669	Gima	727357	9646500	2832
M671	Huangra	765728	9726592	2687
M686	Lindilig	761107	9737821	3632



**Figura 2.2: Localización de estaciones con datos de precipitación en la Cuenca del Rio Paute. Las Coordenadas están en WGS84 y Proyección UTM.**

### 2.2.2 Modelo digital de elevaciones

La base de datos de partida para la obtención del Modelo Digital de Elevaciones del área de estudio es la Cartografía Oficial generada por el Instituto Geográfico Militar del Ecuador (IGM) en escala 1:50000 que es de acceso libre de acuerdo al decreto No. IGM-E- 2001-04 y cuya base digital se encuentra disponible para su descarga en el sitio web oficial del IGM.

La cartografía del IGM es presentada en cartas con extensión geográfica de 10 minutos en latitud y 15 minutos en longitud, dividiendo a todo el Ecuador en una grilla de cartas a las cuales se les ha atribuido nombres y



códigos. Toda el área de estudio es cubierta por 36 cartas cuyos nombres identificatorios son: Alausí, Amazonas, Azogues, Cañar, Cerro de Ayapungo, Chaucha, Chiguinda, Chiquintad, Cuenca, Gima, Girón, Gualaceo, Gualaquiza, Guarumales, Huangra, Indanza, Juncal, Limón, Logroño, Mariano Moreno, Palmira, Panguí, San Carlos de Limón, San Felipe de Molleturo, San Fernando, San Francisco de Gualleturo, San José de Yacumbi, San Juan Bosco, Santiago de Méndez, Sigsig, Sucúa, Taday, Tayuza, Totoras, Volcán Sangay y Zuna.

## 2.3 Métodos

### 2.3.1 Procesamiento de los datos pluviométricos

Los procedimientos de Análisis Exploratorio de Datos (AED) son a menudo la “primera mirada” a los datos. Los modelos y teorías de cómo un sistema se comporta son desarrollados observando los datos a través de gráficos. Dos métodos son particularmente usados: diagramas de caja y gráficos de probabilidad.

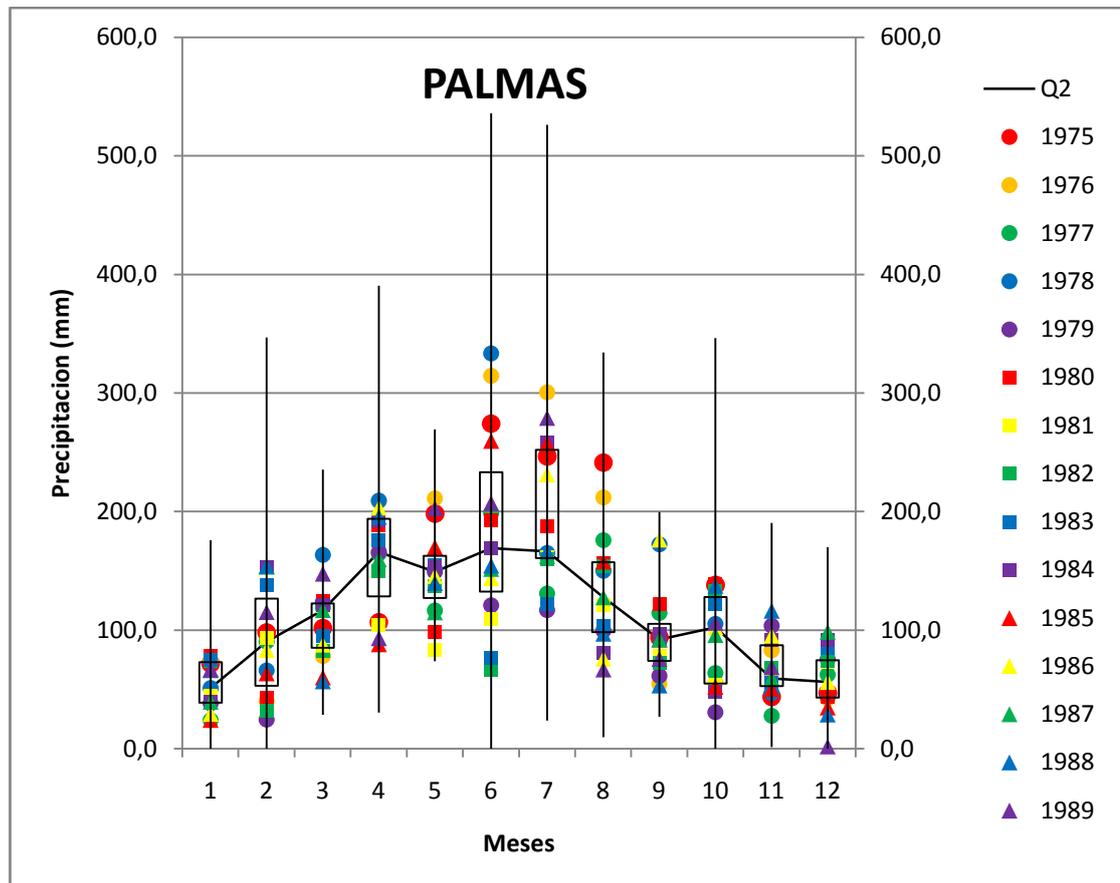
Los diagramas de caja son gráficos concisos que presentan un resumen de la distribución de los datos. (Helsel & Hirsch, 2002). Para establecer los valores de los bigotes de los diagramas de caja existen muchos criterios, pero el más utilizado es el propuesto por (Tukey, 1977) quien calcula 4 barreras, dos interiores y dos exteriores, donde RIC es el rango intercuartil de la serie de datos:

- Barrera interior inferior = Primer cuartil – 1,5(RIC)
- Barrera interior superior = Tercer cuartil + 1,5(RIC)
- Barrera exterior inferior = Primer cuartil – 3(RIC)
- Barrera exterior superior = Tercer cuartil + 3(RIC)

Se realizó diagramas de caja para cada serie de datos mensuales (periodo 1975-1989) y para cada una de las 23 estaciones utilizadas en



este estudio. Los diagramas de caja de todas las estaciones se presentan en el Anexo A, en tanto que a manera de un ejemplo se presenta en el Figura 2.3 el diagrama de caja de la estación M045 Palmas.



**Figura 2.3: Diagrama de caja de los datos de la estación M045 Palmas. Q2 es la Mediana o segundo cuartil.**

Dentro de un AED la identificación de valores atípicos es el primer control de calidad de datos. Los valores atípicos pueden ser medidas erróneas o correctos valores extremos. (González, 2000). La comprobación temporal de valores atípicos para una estación particular se basa en la premisa de que un valor mensual individual debe ser similar a valores del mismo mes para otros años. (Eischeid, 1995). Valores atípicos son identificados como esos valores que superan un umbral máximo para cada serie temporal,



definidos por:  $P_{out} = Q_{0.75} + 3(IQR)$ , donde  $P_{out}$  es el valor atípico,  $Q_{0.75}$  es el tercer cuartil e  $IQR$  es el rango intercuartil (González, 2000). Utilizando este criterio, se analizó toda la base de datos mensuales pluviométricos de las estaciones en busca de valores atípicos, obteniendo como resultado de estos valores los presentados en la Tabla 2.2

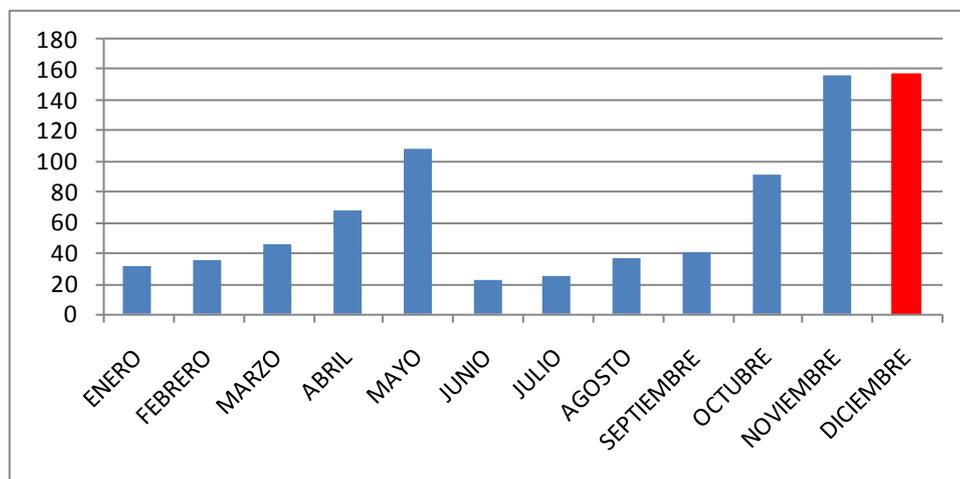
**Tabla 2.2: Valores atípicos de datos mensuales de precipitación**

<b>CODIGO</b>	<b>ESTACION</b>	<b>MES</b>	<b>AÑO</b>	<b>VALOR</b>	<b>Pout</b>
M414	Chanin	SEP	1986	190.1	140.4
M541	CochapambaQuingeo	JUL	1975	88.2	74.5
M067	Cuenca Aeropuerto	FEB	1975	213.6	178.5
M418	Cumbe	ENE	1988	108.6	99.5
		DIC	1982	156.4	108.5
M141	El Labrado	ABR	1988	264.4	242.2
M669	Gima	DIC	1982	143.0	134.6
M197	Jacarin	JUL	1975	102.7	61.1
		AGO	1975	63.0	50.1
M583	Pindilig	MAR	1984	260.5	232.1
M417	PiscicolaChirimachay	FEB	1975	488.5	351.8
M426	Ricaurte	JUL	1975	121.4	92.6
M427	Sayausi	JUL	1975	155.4	117.0
		AGO	1975	104.5	93.8
M206	Guarumales	OCT	1980	419.5	378.2



Los valores atípicos encontrados no corresponden a datos rellenados de las series, son datos que constan en las bases originales (oficiales). Analizando uno a uno los valores atípicos se puede decir que los que corresponden a las estaciones M541 Cochapamba, M067 Cuenca Aeropuerto, M418 Cumbe, M669 Gima, M197 Jacarín, M426 Ricaurte, M427 Sayausí y M206 Guarumales, si bien tienen un valor extremo, este valor mantiene la tendencia del comportamiento intraanual para el año respectivo, es decir valores similares con los meses adyacentes, como se puede apreciar en los Figuras 2.4 y 2.5

En tanto que los valores atípicos de las estaciones M414 Chanín, M141 El Labrado, M583 Pindilíg y M417 Piscícola, pueden deberse a errores de las mediciones o a eventos influenciados por anomalías, como se puede apreciar en los Figuras 2.6 a 2.9.



**Figura 2.4: Histograma de precipitaciones mensuales del año 1982 de la estación M418.**

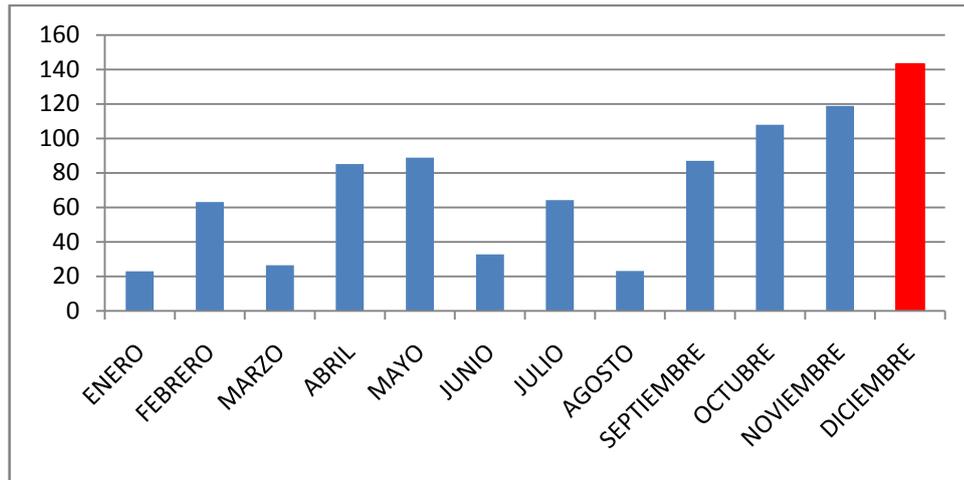


Figura 2.5: Histograma de precipitaciones mensuales del año 1982 de la estación M669.

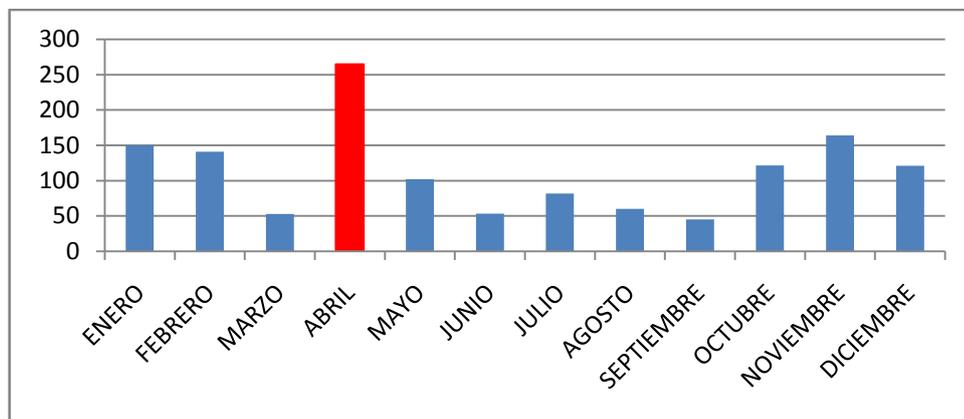


Figura 2.6: Histograma de precipitaciones mensuales del año 1988 de la estación M141.

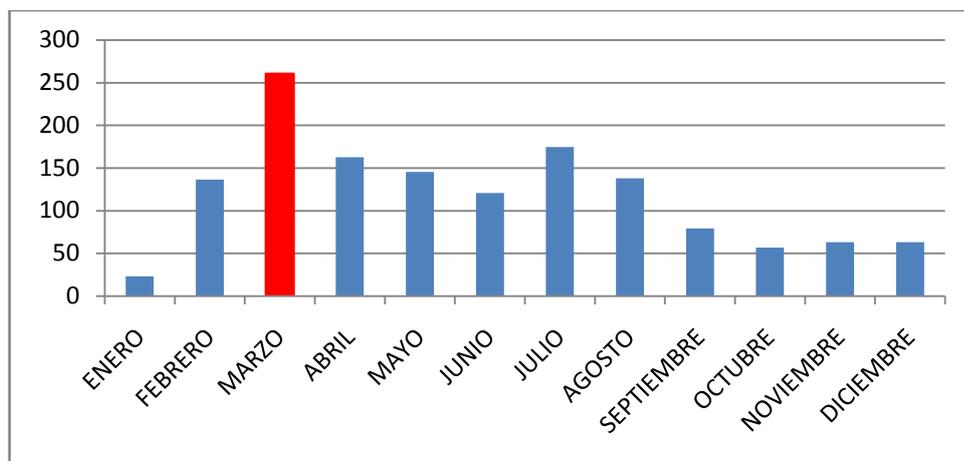
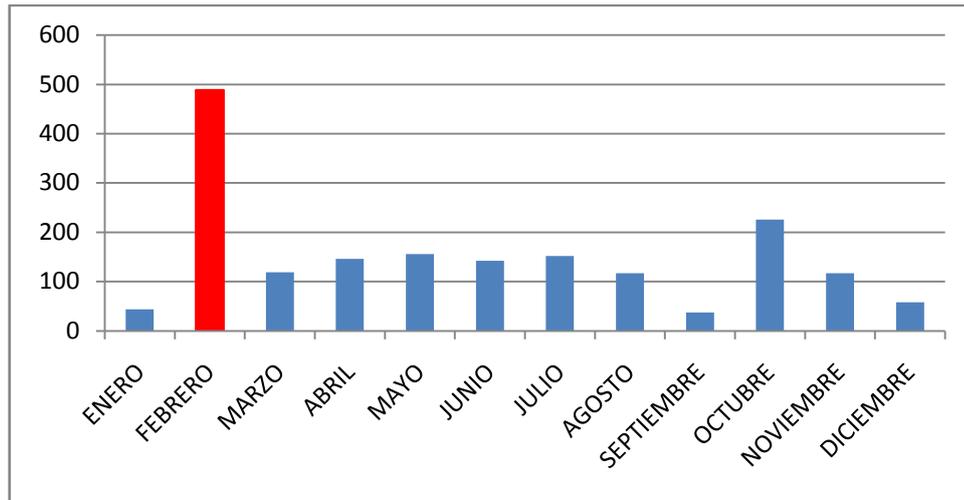
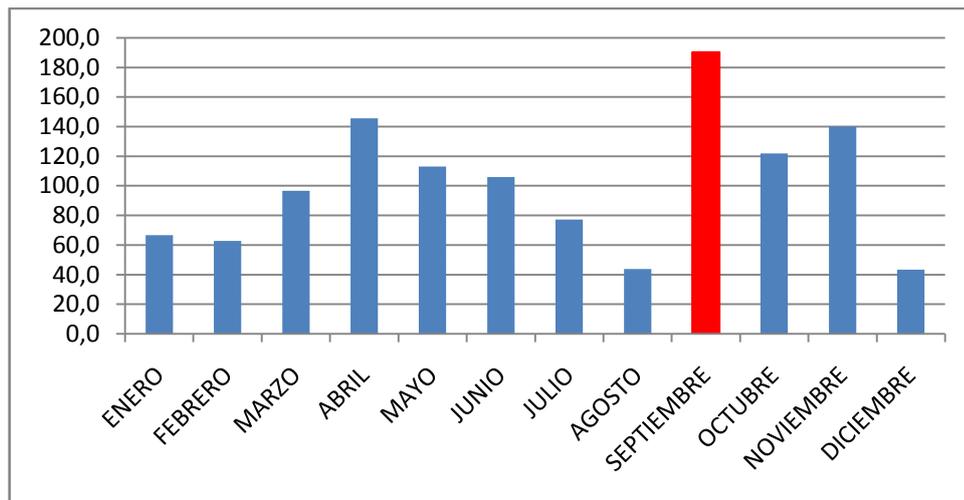


Figura 2.7: Histograma de precipitaciones mensuales del año 1984 de la estación M583.



**Figura 2.8:** Histograma de precipitaciones mensuales del año 1975 de la estación M417.



**Figura 2.9:** Histograma de precipitaciones censuales del año 1986 de la estación M414.

Valores atípicos pueden ser sustituidos por los valores límite  $P_{out}$ , de esta manera se reduce el perjuicio causado por los atípicos (resistencia estadística) y al mismo tiempo se mantiene la información de un evento extremo (González, 2000).



En este estudio, luego de hacer una estimación de los valores medios mensuales sustituyendo los valores atípicos por los valores límites  $P_{out}$ , y comparando con los valores medios mensuales de los datos originales, prácticamente no existe diferencias significativas en sus valores, por lo que se tomó la decisión de conservar los valores originales de la base de datos sin la modificación de sus valores atípicos.

### **2.3.1.1 Regímenes de precipitación**

En la zona de estudio se han encontrado 4 regiones de lluvia, dos con regímenes Unimodales (UM1 y UM2) ubicadas en la salida de la cuenca y dos con regímenes Bimodales (BM1 y BM2) ubicadas en el valle Inter-Andino y en los costados orientales y occidentales altos de la cuenca en las zonas de transición entre el valle Inter-Andino y las cuencas del Amazonas y Pacífico, lo cual complica la estimación espacial de la precipitación.

Analizando los histogramas de las series mensuales de las 23 estaciones para cada año de registro en el período 1975 – 1989 y los valores medios mensuales en el período (se presentan en el Anexo B), y aplicando los criterios utilizados por (Célleri, 2007) para la clasificación de los regímenes de lluvia se tiene que en la zona de estudio las 23 estaciones utilizadas presentan los regímenes indicados en la Tabla 2.3.



**Tabla 2.3: Regímenes de precipitación de las estaciones utilizadas en este estudio**

ESTACION		REGIMEN DE PRECIPITACION
CODIGO	NOMBRE	
M045	Palmas - Azuay	Unimodal 2
M067	Cuenca Aeropuerto	Bimodal 1
M138	Paute	Bimodal 1
M139	Gualaceo	Bimodal 1
M141	El Labrado	Bimodal 2
M197	Jacarin	Bimodal 1
M206	Guarumales	Unimodal 1
M217	Penas Coloradas	Unimodal 1
M410	Rio Mazar Rivera	Unimodal 2
M414	Chanin	Bimodal 1
M416	El Pan	Unimodal 2
M417	PiscicolaChirimichay	Bimodal 2
M418	Cumbe	Bimodal 1
M426	Ricaurte Cuenca	Bimodal 1
M427	Sayausi	Bimodal 1
M541	CochapambaQuingeo	Bimodal 1
M583	Pindilig	Unimodal 2
M625	BiblianInecel	Bimodal 1
M664	SigsigInecel	Bimodal 2
M668	Mataglo Gulag	Unimodal 2
M669	Gima	Bimodal 1
M671	Huangra	Unimodal 2
M686	Lindilig	Bimodal 2

### 2.3.1.2 Años normales y años extremos

Con la finalidad de encontrar anomalías o tendencias en el comportamiento de la precipitación anual en toda la zona de estudio, se realizó un análisis de Años Normales y Años extremos con los valores medios anuales para el período 1975 – 1989, en cada estación de medición considerada.



Se considera años extremos de precipitación aquellos cuyos valores de precipitación estén por encima del Percentil 90 (P90) y bajo el Percentil 10 (P10), entendiendo como años “muy húmedos” a los primeros y como años “muy secos” a los segundos (Lazaro, Rodrigo, Gutierrez, & Domingo, 2001).

En todas las estaciones de la zona de análisis, en cada año de registro, la característica de años extremos o normales no es constante. Por esto se toma como criterio para definir la condición de un año en toda la zona como el valor que corresponda a la mayoría de las estaciones de medición. Obteniendo como resultado que en la zona de estudio y en el período de tiempo analizado (1975 – 1989), los Años Secos corresponden a 1979 y 1985, los Años Húmedos a 1975 y los demás son Años Normales.

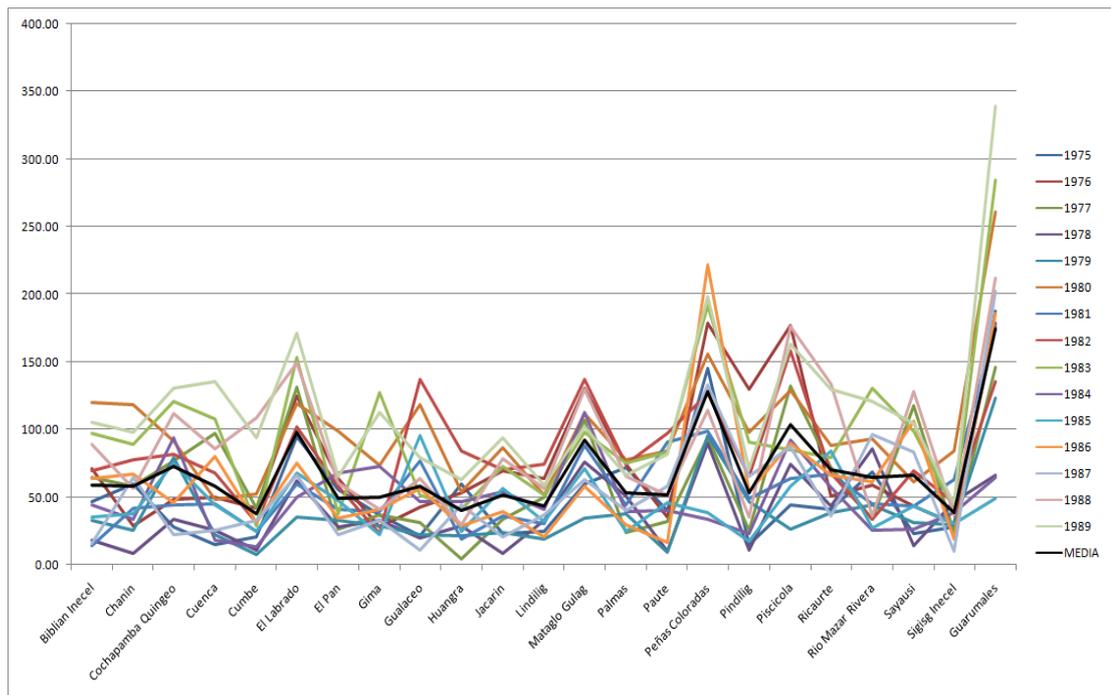
**Tabla 2.4: Años normales, secos y húmedos de las estaciones utilizadas en este estudio**

ESTACION	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989
Biblian Inecel	N	H	N	N	N	N	N	H	N	N	S	N	S	N	N
Charin	N	N	N	N	S	N	N	H	N	N	S	N	N	H	N
Cochapamba Quingeo	H	N	N	S	N	N	N	N	N	H	S	N	N	N	N
Cuenca	H	N	N	N	N	H	N	N	N	N	S	N	S	N	N
Cumbe	H	N	S	N	N	N	S	N	N	N	N	N	N	H	N
El Labrado	H	H	N	N	S	N	N	N	N	N	S	N	N	N	N
El Pan	N	H	N	H	S	N	S	N	N	N	N	N	N	N	N
Gima	H	N	N	N	S	N	S	N	N	H	N	N	N	N	N
Gualaceo	H	N	S	N	N	N	N	N	N	N	S	N	N	H	N
Huangra	H	N	N	N	N	N	S	N	N	H	S	N	N	N	N
Jacarin	H	N	N	N	N	N	N	N	N	H	S	N	S	N	N
Lindilig	N	N	N	N	N	N	S	S	H	H	N	N	N	N	N
Mataglo Gulag	N	N	N	N	S	H	S	N	N	N	N	N	N	N	H
Palmas	H	H	N	N	S	N	S	N	N	N	N	N	N	N	N
Paute	N	H	S	N	N	N	N	H	N	N	S	N	N	N	N
Peñas Coloradas	N	H	N	N	S	H	N	S	N	N	N	N	N	N	N
Pindilig	H	H	N	N	S	N	N	N	N	N	S	N	N	N	N
Piscicola	H	N	S	N	S	N	N	N	N	H	N	N	N	N	N
Ricaurte	H	N	N	N	N	N	N	N	N	N	S	N	S	H	N
Rio Mazar Rivera	H	H	N	N	S	N	N	N	N	N	N	N	N	N	S
Sayausi	H	N	N	N	S	N	N	N	N	N	S	N	N	H	N
Sigisg Inecel	H	H	N	N	S	N	N	N	N	N	S	N	N	N	N
Guarumales	H	H	N	N	S	N	N	N	N	N	S	N	N	N	N
AÑO NORMAL (N)	7	13	19	21	10	20	16	18	22	17	9	23	19	18	21
AÑO SECO (S)	0	0	4	1	13	0	7	2	0	0	14	0	4	0	1
AÑO HUMEDO (H)	16	10	0	1	0	3	0	3	1	6	0	0	0	5	1



### 2.3.1.3 Homogeneidad de los datos de las series mensuales de las estaciones

Con el fin de averiguar si existen uniformidad en la serie de datos mensuales y encontrar anomalías en el comportamiento de la precipitación mensual en el área de estudio, o verificar si mantienen un comportamiento similar año a año en cada mes, se realizó una correlación entre los valores mensuales de cada año de las estaciones con el valor medio mensual para el período 1975 – 1989, de igual manera se realizó histogramas de estas series para visualizar gráficamente la existencia de correlación. Ver como ejemplo histograma del mes de enero en el Figura 2.10 y los histogramas de los demás meses en el Anexo C.



**Figura 2.10: Histograma de precipitaciones del mes de enero de las 23 estaciones.**



Una de las maneras de saber la existencia de correlación entre variables es aplicar el coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ). Resulta difícil precisar a partir de qué valor del coeficiente de correlación se puede considerar que existe una correlación lineal entre dos variables, sin embargo, para tener un referente, utilizamos lo anotado por (Bisquerra, 1989) para la interpretación de los valores de los coeficientes de correlación entre series de datos.

**Tabla 2.5: Interpretación del coeficiente de correlación (Bisquerra, 1989)**

$r = 1$	correlación perfecta.
$0.8 < r < 1$	correlación muy alta
$0.6 < r < 0.8$	correlación alta
$0.4 < r < 0.6$	correlación moderada
$0.2 < r < 0.4$	correlación baja
$0 < r < 0.2$	correlación muy baja
$r = 0$	correlación nula

**Tabla 2.6: Coeficiente de Correlación entre series de datos mensuales de cada año de las estaciones con el valor medio mensual para el período 1975 – 1989**

MES	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989
ENERO	0.84	0.82	0.79	0.65	0.81	0.88	0.82	0.68	0.88	0.35	0.30	0.86	0.85	0.81	0.93
FEBRERO	0.56	0.57	0.91	0.82	0.40	0.05	0.89	0.60	0.48	0.93	0.81	0.47	0.66	0.92	0.76
MARZO	0.87	0.88	0.92	0.69	0.48	0.88	0.69	0.67	0.76	0.72	0.85	0.84	0.60	0.82	0.00
ABRIL	0.90	0.93	0.91	0.94	0.86	0.82	0.90	0.89	0.88	0.87	0.80	0.94	0.86	0.72	0.90
MAYO	0.94	0.97	0.96	0.67	0.96	0.97	0.96	0.86	0.95	0.95	0.95	0.98	0.80	0.96	0.94
JUNIO	0.94	0.98	0.94	0.96	0.95	0.99	0.96	0.95	0.93	0.99	0.98	0.92	0.94	0.92	0.95
JULIO	0.93	0.96	0.97	0.99	0.98	0.98	0.98	0.97	0.96	0.98	0.99	0.97	0.97	0.97	0.91
AGOSTO	0.97	0.97	0.98	0.96	0.94	0.98	0.97	0.97	0.98	0.95	0.84	0.96	0.97	0.92	0.96
SEPTIEMBRE	0.94	0.89	0.89	0.96	0.97	0.90	0.94	0.93	0.97	0.92	0.97	0.89	0.94	0.84	0.88
OCTUBRE	0.70	0.67	0.86	0.80	0.91	0.95	0.82	0.72	0.79	0.83	0.89	0.87	0.79	0.80	0.74
NOVIEMBRE	0.42	0.74	0.88	0.89	0.75	0.71	0.52	0.43	0.88	0.59	0.78	0.86	0.77	0.91	0.82
DICIEMBRE	0.33	0.81	0.85	0.70	0.73	0.83	0.89	0.74	0.87	0.84	0.52	0.83	0.66	0.46	0.58



Utilizando el criterio de (Bisquerra, 1989) a los valores de la Tabla 2.6, se aprecia que en el 97% de los casos la tendencia mensual e inter-anual de la precipitación mantiene una moderada correlación con respecto a los valores de la media ( $>0.40$ ), es mas en el 90% de los casos las correlaciones son altas o muy altas ( $>0.60$ ), estableciendo que en estos casos no existe una variabilidad de la tendencia iter-anual de la precipitación. Únicamente en los meses de enero de los años 1984 y 1985, febrero de 1980, marzo de 1989 y diciembre de 1975, las correlaciones con los valores de la media son bajos o muy bajos, pudiendo considerarlos como meses atípicos de la tendencia.

Concluyendo que en el 97% de los casos, las series mensuales tienen el mismo comportamiento interanual, por lo que los valores que corresponden a la media mensual del período son valores representativos del comportamiento año a año en todo el período de análisis.

### **2.3.2 Procesamiento del modelo digital de elevaciones**

Los Modelos Digitales de Elevación (MDE o su acrónimo en inglés DEM) son utilizados en un extenso rango de investigación y aplicaciones en el análisis de los recursos naturales y su valoración. Estos MDE normalmente son usados para apoyar aplicaciones hidrológicas que dependen de la representación exacta de la estructura de drenaje superficial.

Para el presente estudio se utilizará el algoritmo para computadora ANUDEM desarrollado por Michael Hutchinson (Hutchinson, 1988) (Hutchinson, 1989). La versión de ANUDEM utilizada es la 4.6.3.

ANUDEM es un algoritmo que calcula una grilla regular de un MDE interpolando los valores de elevación hacia una malla mientras se



imponen restricciones que aseguran una estructura de drenaje conectado y la correcta representación de picos y arroyos a partir de los datos de entrada de curvas de nivel y puntos de máxima elevación. El procedimiento de interpolación se diseñó para aprovechar los tipos de datos de entrada comúnmente disponibles y las características conocidas de las superficies de elevación. Este método utiliza una técnica de interpolación de diferencia finita iterativa. Es, esencialmente, una técnica de spline de lámina delgada discretizada a la cual se le modificó la penalización por rugosidad para permitir que el MDE ajustado siga los cambios abruptos en el terreno, como arroyos y picos. (Hutchinson, 1988)

Otro punto a considerar es el tamaño de la celda o cuadrícula base de la grilla del Modelo Digital de Elevaciones, lo cual en este caso está en función de la escala de trabajo utilizada en la generación de la cartografía base del Instituto Geográfico Militar que es 1/50000. (Hengl, 2005) sugiere como tamaño de celda a valores comprendidos entre  $0.0001 \cdot SN$  (resolución legible más fina) y  $0.0025 \cdot SN$  (resolución legible más tosca), siendo SN la escala de trabajo. Entonces si la escala de trabajo de la cartografía base es de 50000, el tamaño de celda del MDE debe estar entre el rango de 5 – 125 metros.

Un MDE con un tamaño de celda no mayor a los 2 kilómetros probablemente es el necesario para resolver efectos orográficos asociados a la precipitación en pequeña escala. (Daly, 1994). (Ranhao, Baiping, & Jing, 2008) utilizan un MDE con un tamaño de celda de 100 metros debido a que en la región de estudio, Montañas Daqing ubicadas en el norte de China, la elevación va de 990 a casi 2340 m s.n.m en pocos kilómetros de distancia horizontal. (Fleming, Chapin, & Cramer, 2000), en su trabajo concluye que mapas climáticos razonables pueden



ser generados con una resolución de 1 km cuando las regiones en estudio tienen una baja densidad de estaciones de medición climáticas.

Para el presente estudio se escogió un tamaño de celda de 100 metros para la obtención del MDE.

### **2.3.3 Determinación de variables topográficas y correlación con la precipitación**

Numerosos estudios han identificado una estrecha relación entre la altura y la precipitación en regiones montañosas del mundo, por ejemplo (Houghton, 1979), (Hevesi, 1992), (Basist, Bell, & Meentemeyer, 1994), (Singh & Kumar, Effect of orography on precipitation in the western Himalayan region, 1997), (Hay, Viger, & McCabe, 1998), (Ninyerola, Pons, & Roure, 2000), (Kyriakidis, Kim, & Miller, 2001), (Suzuki, Nakakita, Hasebe, & Ikebu, 2004), (Guan, Wilson, & Makhnin, 2005), (Yang, Ma, & Chen, 2011)

Al igual que con la altura, diversos estudios han encontrado altas relaciones entre valores de precipitación y variables topográficas, así por ejemplo (Ramírez, Mendoza, Salas, & Ribstein, 1995) utilizan como variables topográficas a la distancia respecto al eje de la cordillera y la orientación de los valles de las subcuencas; (Hay, Viger, & McCabe, 1998) también utiliza la pendiente, orientación, distancia y altura de barreras topográficas, definiendo a éstas como los picos de las montañas en las diferentes direcciones cardinales; (Guan, Wilson, & Makhnin, 2005) correlaciona a la precipitación con funciones trigonométricas del Aspecto, definiendo a este como el ángulo de orientación de la pendiente del terreno; (Perry & Konrad, 2006) encuentran correlaciones entre precipitación y variables como la exposición de los valles, pendiente,



latitud, longitud y combinaciones entre estas variables en la región montañosa Appalachian, USA; (Sevruk, Matokova, & Toskano, 1998) determina que la combinación de altitud, longitud y latitud explican en un 75% la variación espacial de la precipitación en la Cuenca de los Alpes Suizos; (Portalés, Boronat, Pardo, & Balaguer, 2010) utiliza como variables topográficas para relacionar con la precipitación en la región de Valencia en España a la latitud, longitud, orientación, pendiente, distancia a la línea costera y productos escalares de estas variables; (Niekerk & Joubert, 2011) relaciona a la precipitación con la latitud, longitud, altitud y el valor cromático de la sombra de un modelo digital de elevaciones para diferentes azimuts y ángulos verticales de iluminación (*hilshade*).

Para algunas variables, el valor medio en una zona homogénea que encierra a un punto dado permite incorporar los efectos locales, y este valor tiene una importancia mayor que el valor propio del punto (Daly, 1994) y (Wotling & Bouvier, 2000); (Konrad, 1996) utiliza la elevación media de una grilla de 10 km por 10 km centrada sobre el punto de la estación de medición de precipitación para obtener una relación de altura con precipitación, concluyendo que estos valores medios de alturas están más asociados que los valores puntuales. (Perry & Konrad, 2006) además de utilizar la elevación y pendiente desde un MDE de 1km de tamaño de celda, también obtienen valores de elevación y pendiente medias para áreas de influencia de 10 y 20 km<sup>2</sup> con centro en cada celda del MDE para correlacionar con datos de precipitación, así como también obtienen valores de la variable Exposición como la diferencia entre la altura de la celda del MDE y la elevación del punto más alto dentro de radios de influencia de 50, 100 y 150 kilómetros; en tanto que (Marquínez, Lastra, & García, 2003) y (Ranhao, Baiping, & Jing, 2008) utilizan valores medios de las variables topográficas dentro de áreas de microcuencas para aumentar la representatividad de las estaciones, asumiendo estos valores medios de las variables como valores de las respectivas estación de



medición localizadas dentro de la microcuencas. (Portalés, Boronat, Pardo, & Balaguer, 2010) utilizan las variables elevación, pendiente y desnivel no como valores puntuales, sino que toman el valor promedio dentro de una circunferencia de 5 km de radio, con la finalidad de suavizar los efectos locales y mejorar la integración de las características principales del entorno topográfico. Otros estudios utilizan valores medios de las variables topográficas para cada celda de un MDE asignando a ésta los valores que corresponden a círculos trazados con diferentes radios de influencia, como realizan por ejemplo (Hay, Viger, & McCabe, 1998), (Suzuki, Nakakita, Hasebe, & Ikebu, 2004) entre otros.

Para el presente estudio se utilizará las siguientes variables secundarias:

- a) la altura puntual de la estación;
- b) la altura, pendiente, aspecto y rango (diferencia entre máxima y mínima altura) para círculos de influencia trazados desde la estación con radios de 3, 5, 10, 15, 20 kilómetros;
- c) la altura, pendiente, aspecto y rango (diferencia entre máxima y mínima altura) para un anillo circunferencial con radios exterior e interior de 15 y 10 kilómetros respectivamente;
- d) barreras topográficas asumidas como alturas de puntos situados en las diferentes direcciones cardinales en un radio de 5 kilómetros,
- e) diferencia de alturas entre puntos de ubicados en radios de influencia y la altura puntual de la estación;
- f) valores de la longitud y latitud de la estación;
- g) distancia desde la estación hacia diferentes sitios que pueden ser considerados influyentes sobre la precipitación como es la línea costera, la cordillera Occidental y la cordillera Oriental;
- h) otras variables como la orientación de las subcuencas que contienen a la estación, funciones trigonométricas del aspecto u orientación de círculos de influencia de la estación; y productos escalares entre las variables anotadas.



### **2.3.4 Métodos de interpolación y su validación**

El método clásico de Thiessen y tres métodos de interpolación, uno determinístico como es el caso del peso del inverso de la distancia IDW y dos geoestadísticos como kriging ordinario y cokriging, se utilizarán como interpoladores o estimadores de precipitación. Los primeros tres métodos usan sólo información de lluvia, mientras el método cokriging usará a más de los datos de precipitación a las variables derivadas de la topografía como auxiliares de interpolación. La validación cruzada, que se describe con amplitud en el numeral 2.3.4.5, se usará como técnica para identificar el método que mejores resultados presente.

En lo que resta del capítulo se describen los detalles matemáticos sobre los métodos mencionados y su validación.

#### **2.3.4.1 Polígonos de Thiessen**

El método de los Polígonos de Thiessen es equivalente al método del vecino más próximo; todos los puntos dentro del polígono tienen el mismo valor que es igual al valor del punto con datos desde el cual se genera el polígono; en la práctica, esto se resuelve por el método muy conocido de dibujar los polígonos de Voronoi alrededor de cada uno de los puntos con datos (Pardo, 1998).

Este método es uno de los más fáciles y simples, pero las limitaciones del método son evidentes; cada predicción se basa en sólo una medida, no hay ninguna estimación del error y la información de los puntos vecinos se ignora (Webster & Oliver, 2007).



### 2.3.4.2 IDW

IDW (*InverseDistanceWeight*, Peso del Inverso de la Distancia) es un método avanzado de la técnica del vecino más próximo que utiliza la distancia de los puntos con datos hacia el punto desconocido, asignando un peso a los diferentes puntos con datos. Este método asume que cada punto posee una influencia local que disminuye con la distancia; de esta manera, el método pondera con mayor fuerza a los puntos con datos cercanos al punto de valor desconocido y con menor intensidad sobre aquellos ubicados a mayor distancia (Tveito & Schöner, 2002).

IDW es un método de interpolación que utiliza los promedios de los valores de entrada, por lo que el resultado de los valores de interpolación jamás superará los límites máximos y mínimos establecidos en los puntos de entrada del análisis.

La función matemática de IDW es la siguiente:

$$Z_j^* = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{h_{ij}^\beta}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{h_{ij}^\beta}} \quad (2.1)$$

Donde:

$Z_j^*$  = es el valor estimado en el punto j;

$Z_i$  = es el valor en el punto i;

i = índice para los puntos vecinos;

j = índice para el punto a ser estimado;

$h_{ij}$  = distancia entre el punto a ser estimado (j) y los puntos vecinos (i);

$\beta$  = potencia del peso.



Mediante IDW es posible controlar la importancia de los puntos conocidos sobre los valores interpolados en base a la distancia y la potencia del peso. Al definir una potencia alta, mayor será el énfasis sobre los puntos más cercanos en tanto que al definir una potencia menor, se le dará una mayor importancia a los puntos más distantes.

### 2.3.4.3 Krigingordinario

El objetivo de la técnica kriging es predecir valores de una variable en sitios sin información localizados en la posición  $(x_0)$  dentro del dominio de un sistema  $(D)$  usando la información disponible en otra parte del dominio  $D(x_1, x_2, \dots, x_n)$ . Esto puede llevarse a cabo expresando  $Z(x_0)$  (donde  $Z(x): x \in D$ ) como una combinación lineal de los datos  $Z(x_1), Z(x_2), \dots, Z(x_n)$ , tal que:

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (2.2)$$

Donde  $\lambda_i$  es el peso kriging para el valor del parámetro  $Z(x_0)$  para  $n$  puntos cercanos de la muestra a ser usado en la estimación. El peso óptimo  $\lambda_i$  es calculado de tal manera que la suma de los cuadrados del error sea mínimo al estimar  $Z^*(x_0)$  por  $Z(x_0)$ .

El kriging ordinario, que es el tipo de kriging normalmente usado, predice los resultados en la forma de una combinación lineal de valores medidos cuyos pesos dependen de la correlación espacial entre ellos. La suma de los pesos es igual a 1. La presunción anterior de este método implica que el proceso espacial debe asumirse como de estacionariedad intrínseca que significa que los datos de entrada no cambiarán con el tiempo o espacio y por lo tanto la media y la varianza son constantes. La condición



de estacionariedad intrínseca de la serie de datos de entrada es la desventaja de este método, por cuanto los procesos que involucran variables meteorológicas raramente son estacionarios intrínsecos.

El kriging ordinario se basa en dos presunciones. Primero, la media del proceso se asume como constante y es invariante dentro del dominio espacial. Esto se expresa como:

$$E[Z(x + h) - Z(x)] = 0 \quad (2.3)$$

Donde E es el valor esperado, (x) y (x + h) pertenecen al dominio de los datos, y h es la distancia entre dos puntos.

Segundo, se asume que la varianza de la diferencia entre dos valores sólo es función de la distancia h entre los dos puntos, y no de su ubicación espacial x. La varianza se expresa como:

$$Var[Z(x + h) - Z(x)] = 2\gamma(h) \quad (2.4)$$

Donde la función  $\gamma(\mathbf{h})$  es el semivariograma.

Basado en estas premisas, la ecuación de kriging ordinario se expresa como (Webster & Oliver, 2007):

$$\gamma(h, \alpha) = \frac{1}{2N(h, \alpha)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2 \quad (2.5)$$



Donde:

$\gamma(h,\alpha)$  = semivarianza como una función de la magnitud de la distancia entre puntos o vector de separación ( $h$ ) y su dirección ( $\alpha$ ).

$N(h,\alpha)$  = número de pares de observación separado por la distancia  $h$  y su dirección.

$Z(x_i)$  = variable aleatoria en la posición  $x_i$ .

Para kriging ordinario, el peso  $\lambda_i$  mostrado en ecuación (2.2) se determina para cumplir las condiciones presentadas en las ecuaciones (2.3) y (2.4) resolviendo el siguiente sistema de ecuaciones lineales:

$$\sum_{i=1}^{n(x)} \lambda_i(x) \gamma(x_j - x_i) - \mu(x) = \gamma(x_j - x) \quad j= 1,2,\dots,n(x)$$

$$\sum_{i=1}^{n(x)} \lambda_i(x) = 1 \quad (2.6)$$

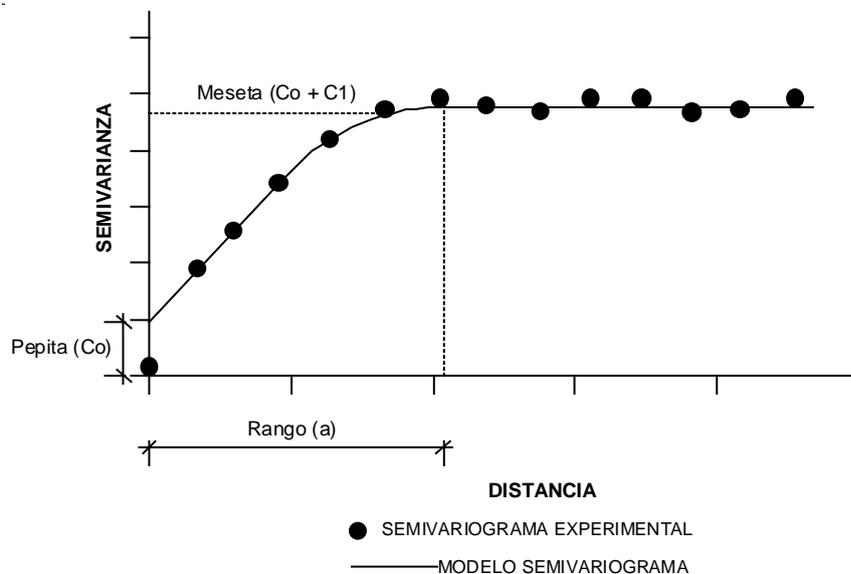
Donde  $\mu(x)$  es el parámetro de Lagrange que obliga a mantener la condición de igualar la sumatoria de los pesos a la unidad. La información necesaria para resolver el sistema de ecuaciones (2.6) es el valor del Semivariograma ( $\gamma$ ), para lo cual se utiliza la ecuación (2.5).

### Calculo del semivariograma

El semivariograma es el valor promedio de la diferencia al cuadrado de los valores de la propiedad en dos puntos separados por una distancia  $|h|$ , es independiente de la localización  $x$ , pero depende del módulo y de la dirección del vector  $h$ . (Ecuación 2.5)

La solución del problema de predicción espacial kriging requiere del conocimiento de la estructura de autocorrelación para cualquier posible distancia entre sitios dentro del área de estudio. El cálculo del semivariograma experimental es realizado sólo para algunas distancias promedios particulares. Por ello se hace necesario el ajuste de modelos que generalicen lo observado en el semivariograma experimental a cualquier distancia. (Giraldo, 2005)

Existen diversos modelos teóricos de semivarianza que pueden ajustarse al semivariograma experimental. En general dichos modelos pueden dividirse en no acotados (lineal, logarítmico, potencial) y acotados (esférico, exponencial, gaussiano). Los del segundo grupo garantizan que la covarianza de los incrementos es finita, por lo cual son ampliamente usados cuando hay evidencia de que presentan buen ajuste (Giraldo, 2005). Todos estos modelos tienen tres parámetros comunes (Figura 2.11) que son descritos a continuación:



**Figura 2.11: Parámetros de modelos de semivariograma**



**Efecto Pepita o Nugget (Co):** representa una discontinuidad puntual del semivariograma en el origen. Puede ser debido a errores de medición en la variable o a la escala de la misma, en algunas ocasiones puede ser indicativo de que parte de la estructura espacial se concentra a distancias inferiores a las observadas.

**Meseta o Sill:** es la cota superior del semivariograma. También puede definirse como el límite del semivariograma cuando la distancia  $h$  tiende a infinito. La meseta puede ser o no finita. Los semivariogramas que tienen meseta finita cumplen con la hipótesis de estacionariedad fuerte; mientras que cuando ocurre lo contrario, el semivariograma define un fenómeno natural que cumple sólo con la hipótesis intrínseca. La meseta se denota por  $C1$  o por  $(C0 + C1)$  cuando el efecto Pepita es diferente de cero.

**Rango (a):** en términos prácticos corresponde a la distancia a partir de la cual dos observaciones son independientes. El rango se interpreta como la zona de influencia. Existen algunos modelos de semivariograma en los que no existe una distancia finita para la cual dos observaciones sean independientes; por ello se llama rango efectivo a la distancia para la cual el semivariograma alcanza el 95% de la meseta. Entre más pequeño sea el rango, más cerca se está del modelo de independencia espacial.

## **Modelos teóricos de semivariograma**

### **Modelo esférico**

Tiene un crecimiento rápido cerca al origen, pero los incrementos marginales van decreciendo para distancias grandes, hasta que para distancias superiores al rango los incrementos son nulos.



Su expresión matemática es la siguiente:

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C_1 \left( \frac{3}{2} \left( \frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left( \frac{h}{a} \right)^3 \right) & h \leq a \\ C_0 + C_1 h & h > a \end{cases} \quad (2.7)$$

### Modelo exponencial

Este modelo se aplica cuando la dependencia espacial tiene un crecimiento exponencial respecto a la distancia entre las observaciones. El valor del rango es igual a la distancia para la cual el semivariograma toma un valor igual al 95% de la meseta. Su expresión matemática es la siguiente:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left( 1 - \exp \left( \frac{-3h}{a} \right) \right) \quad (2.8)$$

### Modelo gaussiano

Al igual que en el modelo exponencial, la dependencia espacial se desvanece solo en una distancia que tiende a infinito. El principal distintivo de este modelo es su forma parabólica cerca al origen. Su expresión matemática es la siguiente:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left( 1 - \exp \left( \frac{-h^2}{a} \right) \right) \quad (2.9)$$

### Modelos monómicos

Corresponden a los modelos que no alcanzan la meseta. Su uso puede ser delicado debido a que en algunos casos indican la presencia de no estacionariedad en alguna dirección. Su expresión matemática es la siguiente:



$$\gamma(h) = kh^\theta \quad 0 < \theta < 2 \quad (2.10)$$

### Modelo de Independencia (Pepita puro)

Es indicativo de carencia de correlación espacial entre las observaciones de una variable. Su expresión matemática es la siguiente:

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & h = 0 \\ C_0 & h > 0 \end{cases} \quad (2.11)$$

#### 2.3.4.4 Cokriging

El método de predicción espacial cokriging consiste en hacer predicción espacial de una variable con base en su información y en la de algunas variables auxiliares que estén correlacionadas espacialmente con ella (Giraldo, 2005). El predictor cokriging tiene la siguiente expresión en el caso en el que se considera una sola variable auxiliar:

$$Z_{v1}^*(x_0) = \sum_{i=1}^{n1} a_i Z_{v1}(x_i) + \sum_{j=1}^{n2} b_j Z_{v2}(x_j) \quad (2.12)$$

Donde:

$Z_{v1}^*(x_0)$  = predicción de la variable de interés en el punto  $x_0$  no muestreado.

$Z_{v1}(x_i)$ , con  $i=1, 2, \dots, n1$ , representa la variable primaria.

$Z_{v2}(x_j)$ , con  $j=1, 2, \dots, n2$ , representa la variable auxiliar.

$a_i$  y  $b_j$ , con  $i=1, 2, \dots, n1$  y  $j=1, 2, \dots, n2$  respectivamente, representan los pesos o ponderaciones de las observaciones de las variables primaria y auxiliar y se estiman con base en el Modelo Lineal de Correogionalización ajustado a los semivariogramas simples y cruzados. Los pesos  $a_i$  y  $b_j$  se estiman de manera análoga al proceso descrito para el método



krigingordinario, es decir estos serán los que minimizan la varianza del error de predicción sujeta a la restricción de que el predictor sea insesgado.

Si se tienen dos variables regionalizadas  $Z_{v1}(x)$  y  $Z_{v2}(x)$  tomadas en sitios de la región de estudio, no necesariamente iguales, entonces el semivariograma cruzado entre ellas, se estima por:

$$\gamma_{v1v2}(h) = \frac{1}{2n_h} \sum^{n_h} \{Z_{v1}(x+h) - Z_{v1}(x)\} \{Z_{v2}(x+h) - Z_{v2}(x)\} \quad (2.13)$$

Donde  $n_h$  es el número de parejas de datos que se encuentran a una distancia  $h$ .

### Modelo Lineal de Correogionalización (MLC)

El MLC asume que todos los semivariogramas simples y cruzados pueden expresarse como una suma de modelos básicos (exponencial, esférico, gaussiano, etc.) idénticos. Para el caso de dos variables:

$$\begin{aligned} \gamma_{v1}(h) &= \alpha_0 \gamma_0(h) + \dots + \alpha_m \gamma_m(h) \\ \gamma_{v2}(h) &= \beta_0 \gamma_0(h) + \dots + \beta_m \gamma_m(h) \\ \gamma_{v1v2}(h) &= \delta_0 \gamma_0(h) + \dots + \delta_m \gamma_m(h) \end{aligned} \quad (2.14)$$

Donde  $\gamma_{v1}(h)$  y  $\gamma_{v2}(h)$  son los semivariogramas simples,  $\gamma_{v1v2}(h)$  es el semivariograma cruzado.  $\gamma_0(h), \gamma_1(h), \dots, \gamma_m(h)$  son los modelos básicos de semivariograma y  $\alpha, \beta$  y  $\delta$  son constantes.



### 2.3.4.5 Validación cruzada de los métodos

Para evaluar los resultados de la interpolación se utilizará el método de la validación cruzada. La idea central de este procedimiento consiste en simular la no existencia de los puntos con datos (uno por uno) y realizar la interpolación para estimar los valores en estos puntos. Esto dará a conocer el error para cada punto. Esto quiere decir que se supondrá la no existencia de las estaciones y usaremos los datos del resto de estaciones para estimar por interpolación los valores de la estación eliminada. Esto se realizará para cada una de las estaciones.

De esta manera pueden calcularse medidas de error o variación. Valores como la Media del Error (ME), la Media del Error Absoluto (MAE), la Raíz Cuadrada de la Media del Error Cuadrado (RMS), la Media Estandarizada del Error (MS), la Raíz Cuadrada de la Media del Error Estandarizado al Cuadrado (RMSS), la Media del error Estandarizado de Kriging (ASE), entre otros, pueden ser usados para poder valorar la eficacia de los métodos de interpolación (Hevesi, 1992), (Genton & Furrer, 1998), (Pardo, 1998), (Drogue, Humbert, Deraisme, Mahr, & Freslon, 2002), (Diodato, 2005), (Saranguí, Cox, & Madramootoo, 2005), (Jantakat & Ongsomwang, 2011).

En este trabajo se utilizará los parámetros ME, MAE, RMS, MS, RMSS y ASE para evaluar la bondad de los diferentes métodos de interpolación. La formulación matemática para cada parámetro se describe a continuación:

#### Media del error (ME):

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z_{xi}^* - Z_{xi}) \quad (2.15)$$



Donde:

$Z_{xi}^*$  = Valor predicho en el punto xi

$Z_{xi}$  = Valor medido en el punto xi

n = número de puntos

**Media del error absoluto (MAE):**

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Z_{xi}^* - Z_{xi}| \quad (2.16)$$

Donde:

$Z_{xi}^*$  = Valor predicho en el punto xi

$Z_{xi}$  = Valor medido en el punto xi

n = número de puntos

**Raíz de la media del error cuadrado (RMS):**

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z_{xi}^* - Z_{xi})^2} \quad (2.17)$$

Donde:

$Z_{xi}^*$  = Valor predicho en el punto xi

$Z_{xi}$  = Valor medido en el punto xi

n = número de puntos



**Media estandarizada del error (MS):**

$$MS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(Z_{xi}^* - Z_{xi})}{\sigma_{xi}} \quad (2.18)$$

Donde:

$Z_{xi}^*$  = Valor predicho en el punto xi

$Z_{xi}$  = Valor medido en el punto xi

$\sigma_{xi}$  = error estándar de la predicción

n = número de puntos

**Raíz cuadrada de la media del error estandarizado al cuadrado (RMSS):**

$$RMSS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{(Z_{xi}^* - Z_{xi})}{\sigma_{xi}} \right)^2} \quad (2.19)$$

Donde:

$Z_{xi}^*$  = Valor predicho en el punto xi

$Z_{xi}$  = Valor medido en el punto xi

$\sigma_{xi}$  = error estándar de la predicción

n = número de puntos

**Media del error estandarizado de kriging (ASE):**

$$ASE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sigma_{xi}} \quad (2.20)$$



Donde:

$\sigma_{xi}$  = error estándar de la predicción

n = número de puntos

ME debe ser un valor próximo a cero. RMS y ASE son índices que representan la bondad de predicción, y RMSS compara la variación del error con una variación teórica, como la variación del kriging, por consiguiente, debe dar valores cercanos a la unidad (Diodato, 2005).

El valor del MAE más cercano a cero es el indicativo del mejor método (Drogue, Humbert, Deraisme, Mahr, & Freslon, 2002).

En el supuesto de que el modelo del variograma es correcto, el valor de ME debe ser casi cero, RMS debe dar un valor pequeño y RMSS un valor cercano a uno (Pardo, 1998).

La media del error idealmente debe ser cero porque kriging es insesgado. El ME calculado, sin embargo, es un diagnóstico débil porque kriging es sensible a las inexactitudes en el variograma. Nosotros creemos que si RMS es un valor pequeño, el modelo es el correcto. Si el modelo para el variograma es exacto entonces RMS debe ser igual a la varianza de kriging; y también que RMSS debe ser próximo a uno (Webster & Oliver, 2007).



## Capítulo 3

### Resultados y Discusión

#### 3.1 Relación entre la precipitación y variables secundarias derivadas de la topografía

Todas las variables secundarias derivadas de la topografía, como son las alturas, pendientes, aspectos y rangos obtenidos para círculos de influencia de diferentes radios, barreras topográficas, orientación de las microcuencas fueron obtenidas a partir del Modelo Digital de Elevaciones (MDE) de 100 metros de celda derivado de la cartografía en escala 1:50000 y con la ayuda de algoritmos robustos manejados por un Sistema de Información Geográfica (SIG). Entre los algoritmos se encuentran Horn, D8, FD8 para cálculo de pendientes e información de celdas en función de las 8 celdas vecinas, Van Kreveld para determinación de cuencas visuales, KRA para dirección de celdas, Moore para convertir formatos *raster* a formatos vectoriales y otros que procesan análisis matricial, estadísticas de zonas, procesos cartográficos, álgebra de mapas. Otras variables que no son derivadas de la topografía, sino que podrían denominarse derivadas de la geografía, como son distancias euclidianas a la línea costera, a la cordillera Occidental y a la cordillera Oriental desde diferentes puntos de la zona de estudio, son obtenidas igualmente con la ayuda de un SIG.

La estimación del grado de correlación que existe entre la precipitación media mensual y las variables secundarias explicadas en la Tabla 3.1, se ha realizado utilizando el Coeficiente de Correlación de Pearson ( $r$ ) para cada combinación de precipitación y variable secundaria para todos los meses (mes a mes) y para la precipitación media anual. Este proceso viabiliza la identificación y eliminación de variables que no tienen ninguna relación significativa con la precipitación.



No existe un criterio establecido que indique a partir de qué valor del coeficiente de Pearson se asume que existe una alta correlación entre dos variables cualesquiera y más aún en series de datos de precipitación. Un buen referente es lo indicado por (Bisquerra, 1989), lo cual se presentó en la Tabla 2.5 del Capítulo 2.

**Tabla 3.1: Explicativo de las variables utilizadas**

VARIABLE	UNIDAD	DESCRIPCION
H_Est	metros	Altura puntual de la estación de medición
H_3K	metros	Altura media de la circunferencia de influencia de radio 3 Kilómetros
H_5K	metros	Altura media de la circunferencia de influencia de radio 5 Kilómetros
H_10K	metros	Altura media de la circunferencia de influencia de radio 10 Kilómetros
H_15K	metros	Altura media de la circunferencia de influencia de radio 15 Kilómetros
H_20K	metros	Altura media de la circunferencia de influencia de radio 20 Kilómetros
H_15_10K	metros	Altura media de la corona circular de influencia de radios exterior e interior de 15 y 10 Kilómetros
H_15_10NN	metros	Altura media del trapecio circular de influencia de radios exterior e interior de 15 y 10 Kilómetros y 45° de apertura dirección Norte
H_15_10NE	metros	Altura media del trapecio circular de influencia de radios exterior e interior de 15 y 10 Kilómetros y 45° de apertura dirección Noreste
H_15_10EE	metros	Altura media del trapecio circular de influencia de radios exterior e interior de 15 y 10 Kilómetros y 45° de apertura dirección Este
H_15_10SE	metros	Altura media del trapecio circular de influencia de radios exterior e interior de 15 y 10 Kilómetros y 45° de apertura dirección Sureste
H_15_10SS	metros	Altura media del trapecio circular de influencia de radios exterior e interior de 15 y 10 Kilómetros y 45° de apertura dirección Sureste
H_15_10SW	metros	Altura media del trapecio circular de influencia de radios exterior e interior de 15 y 10 Kilómetros y 45° de apertura dirección Suroeste
H_15_10WW	metros	Altura media del trapecio circular de influencia de radios exterior e interior de 15 y 10 Kilómetros y 45° de apertura dirección Oeste
H_15_10NW	metros	Altura media del trapecio circular de influencia de radios exterior e interior de 15 y 10 Kilómetros y 45° de apertura dirección Noroeste
R_3K	metros	Rango (diferencia de alturas máxima y mínima) de la circunferencia de influencia de radio 3 Kilómetros



**Continuación de Tabla 3.1 Explicativo de las variables utilizadas**

<b>VARIABLE</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>DESCRIPCION</b>
R_5K	metros	Rango (diferencia de alturas máxima y mínima) de la circunferencia de influencia de radio 5 Kilómetros
R_10K	metros	Rango (diferencia de alturas máxima y mínima) de la circunferencia de influencia de radio 10 Kilómetros
R_15K	metros	Rango (diferencia de alturas máxima y mínima) de la circunferencia de influencia de radio 15 Kilómetros
R_20K	metros	Rango (diferencia de alturas máxima y mínima) de la circunferencia de influencia de radio 20 Kilómetros
R_15_10K	metros	Rango (diferencia de alturas máxima y mínima) de la corona circular de influencia de radios exterior e interior de 15 y 10 Kilómetros
P_5K	grados	Pendiente media de la circunferencia de influencia de radio 5 Kilómetros
P_10K	grados	Pendiente media de la circunferencia de influencia de radio 10 Kilómetros
P_15K	grados	Pendiente media de la circunferencia de influencia de radio 15 Kilómetros
P_20K	grados	Pendiente media de la circunferencia de influencia de radio 20 Kilómetros
P_15_10K	grados	Pendiente media de la corona circular de influencia de radios exterior e interior de 15 y 10 Kilómetros
A_5K	grados	Aspecto medio de la circunferencia de influencia de radio 5 Kilómetros
A_10K	grados	Aspecto medio de la circunferencia de influencia de radio 10 Kilómetros
A_15K	grados	Aspecto medio de la circunferencia de influencia de radio 15 Kilómetros
A_20K	grados	Aspecto medio de la circunferencia de influencia de radio 20 Kilómetros
A_15_10K	grados	Aspecto medio de la corona circular de influencia de radios exterior e interior de 15 y 10 Kilómetros
O_NN	grados	Angulo medido entre la dirección Norte y la Orientación de las subcuencas de las estaciones de medición
O_NE	grados	Angulo medido entre la dirección Noreste y la Orientación de las subcuencas de las estaciones de medición
O_EE	grados	Angulo medido entre la dirección Este y la Orientación de las subcuencas de las estaciones de medición
O_SE	grados	Angulo medido entre la dirección Sureste y la Orientación de las subcuencas de las estaciones de medición
O_SS	grados	Angulo medido entre la dirección Sur y la Orientación de las subcuencas de las estaciones de medición
O_SW	grados	Angulo medido entre la dirección Suroeste y la Orientación de las subcuencas de las estaciones de medición
O_WW	grados	Angulo medido entre la dirección Oeste y la Orientación de las subcuencas de las estaciones de medición



**Continuación de Tabla 3.1 Explicativo de las variables utilizadas**

VARIABLE	UNIDAD	DESCRIPCION
O_NW	grados	Angulo medido entre la dirección Noroeste y la Orientación de las subcuencas de las estaciones de medición
X	metros	Coordenada UTM de la estación en la dirección Este
Y	metros	Coordenada UTM de la estación en la dirección Norte
D_COSTA	metros	Distancia euclidiana desde la estación hacia la línea costera
D_WEST	metros	Distancia euclidiana desde la estación hacia la cordillera Occidental
D_ORIENTE	metros	Distancia euclidiana desde la estación hacia la cordillera Oriental
IH	metros	Índice de Altitud = $0.7777 * H_{10K} + 0.3333 * H_{15\_10K}$
I_EXP	Hectáreas	Índice de Exposición: Área en circulo de radio 15 km que tenga una altura > ( $H_{est} + 300$ )
Dif_Elev	metros	$H_{10K} - H_{15\_10K}$
B_H	metros	Barrera de altitud = Máxima elevación en corona circular de influencia de radios exterior e interior de 15 y 10 Kilómetros menos $H_{est}$
D_MAXH	metros	Distancia euclidiana entre la estación y el punto de máxima elevación en 15_10KM
DIR_MAXH	metros	Dirección de la línea que une a la estación y el punto de máxima elevación en 15_10KM medida desde el Norte

Algunos trabajos referentes a buscar una relación entre precipitación y otras variables y la significancia de su correlación utilizando el coeficiente de Pearson han sido desarrollados, así por como ejemplo (Konrad, 1996) asume como correlaciones fuertes cuando el coeficiente de Pearson es mayor que 0.60; (Parrilla Alcalá & Ojeda Zújar, 2005) establece que para que realmente sea aplicable una correlación, el Coeficiente de Pearson ( $r$ ) es necesario que tenga un valor superior a 0.70 y, de esa forma, su coeficiente de determinación ( $r^2$ ) explique al menos un 50% de la variable dependiente. (Guan, Wilson, & Makhnin, 2005) en su trabajo adoptan un coeficiente de correlación de 0.75 como el umbral para el uso de las variables secundarias como auxiliar de interpolación de precipitación en el método de cokriging.



En otros estudios realizados, si bien no establecen de forma directa un valor de  $r$  para definir una correlación fuerte entre la precipitación y variables topográficas o geográficas, asumen como buena correlación aquellos valores de  $r$  que tengan un nivel de significancia estadística menor a 0.05 (nivel de confiabilidad mayor al 95%), por ejemplo los trabajos realizados por (Basist, Bell, & Meentemeyer, 1994), (Ninyerola, Pons, & Roure, 2000), (Marquínez, Lastra, & García, 2003), (Buytaert, Celleri, & Willems, 2006), (Yang, Ma, & Chen, 2011), entre otros.

Para el presente estudio, niveles de significancia estadística de 0.05 se obtienen para valores de  $r > 0.413$ . Niveles de significancia de 0.01 y 0.001 se obtienen para valores de  $r > 0.526$  y  $r > 0.640$  respectivamente.

Considerando que las variables derivadas de la topografía se utilizarán como auxiliares de interpolación en el método geoestadísticocokriging, éstas deben presentar buenas correlaciones con las series de datos de la precipitación. Se asume para este estudio que un coeficiente de correlación de Pearson  $r \geq 0.70$  proporcionaría un grado alto de correlación (Bisquerra, 1989). Además este valor indica que la precipitación es explicada en al menos el 50% por la variable topográfica (Parrilla Alcalá & Ojeda Zújar, 2005) y se tendría niveles de significancia estadística menores a 0.05.

En las Tablas 3.2 a 3.8 se presentan los valores del Coeficiente de Correlación de Pearson ( $r$ ) entre las series de datos de precipitación y las variables derivadas de la topografía y geografía, visualizando a los valores de  $r \geq 0.70$  con letra negra.



Se evidencia que en el área de estudio existe una débil o inexistente correlación entre la precipitación mensual y la altura con valores de  $r$  entre -0.28 y 0.06, ya sea para valores puntuales de la altura o valores medios en un área de influencia de circunferencias de diferentes radios (Ver Tabla 3.2).

La correlación entre la precipitación mensual y la altura media de trapecios circulares en las direcciones cardinales, a excepción de las direcciones Este, Sureste y Sur, es débil o inexistente con valores de  $r$  entre -0.20 y 0.31; en tanto que la correlación mejora para las direcciones Este, Sureste y Sur, especialmente en la dirección Sureste llegando incluso en el mes de octubre a tener un  $r = -0.70$  (Ver Tabla 3.3).

**Tabla 3.2: Coeficiente de correlación ( $r$ ) para precipitación y alturas**

PRECIPITACION	VARIABLE TOPOGRAFICA						
	H_Est	H_3K	H_5K	H_10K	H_15K	H_20K	H_15_10K
ENERO	-0.07	-0.08	-0.10	-0.10	-0.05	-0.07	0.01
FEBRERO	0.00	-0.01	-0.02	-0.02	0.02	-0.02	0.06
MARZO	-0.09	-0.13	-0.15	-0.14	-0.11	-0.13	-0.06
ABRIL	-0.14	-0.15	-0.16	-0.15	-0.11	-0.12	-0.05
MAYO	-0.26	-0.28	-0.28	-0.26	-0.22	-0.22	-0.15
JUNIO	-0.22	-0.23	-0.22	-0.20	-0.18	-0.19	-0.14
JULIO	-0.22	-0.22	-0.21	-0.18	-0.14	-0.15	-0.10
AGOSTO	-0.24	-0.23	-0.22	-0.19	-0.16	-0.17	-0.12
SEPTIEMBRE	-0.21	-0.20	-0.20	-0.17	-0.12	-0.12	-0.06
OCTUBRE	-0.18	-0.19	-0.20	-0.21	-0.15	-0.14	-0.07
NOVIEMBRE	-0.11	-0.16	-0.18	-0.19	-0.14	-0.17	-0.08
DICIEMBRE	-0.09	-0.11	-0.14	-0.13	-0.06	-0.06	0.03
ANUAL	-0.19	-0.20	-0.20	-0.19	-0.14	-0.15	-0.09



**Tabla 3.3: Coeficiente de correlación (r) para precipitación y alturas en las 8 direcciones cardinales**

PRECIPITACION	VARIABLE TOPOGRAFICA ALTURA H_15_10 EN LAS 8							
	NN	NE	EE	SE	SS	SW	WW	NW
ENERO	0.20	0.26	-0.37	-0.53	0.44	0.13	-0.06	0.05
FEBRERO	0.19	0.31	-0.33	-0.44	0.53	0.15	-0.04	0.05
MARZO	0.18	0.25	-0.40	-0.53	0.38	-0.01	-0.16	0.00
ABRIL	0.14	0.21	-0.42	-0.58	0.41	0.01	-0.10	0.07
MAYO	0.05	0.11	-0.50	-0.60	0.32	-0.09	-0.18	0.02
JUNIO	0.02	0.14	-0.48	-0.44	0.34	-0.09	-0.20	-0.04
JULIO	0.04	0.16	-0.46	-0.38	0.36	-0.06	-0.17	-0.01
AGOSTO	0.06	0.15	-0.47	-0.45	0.31	-0.07	-0.18	0.00
SEPTIEMBRE	0.13	0.18	-0.44	-0.53	0.38	0.00	-0.10	0.07
OCTUBRE	0.21	0.11	-0.47	<b>-0.70</b>	0.28	-0.01	-0.05	0.16
NOVIEMBRE	0.10	0.21	-0.40	-0.59	0.40	0.00	-0.16	-0.03
DICIEMBRE	0.21	0.26	-0.38	-0.54	0.41	0.11	-0.01	0.12
ANUAL	0.10	0.19	-0.47	-0.53	0.39	-0.02	-0.15	0.03

**Tabla 3.4: Coeficiente de correlación (r) para precipitación y rangos**

PRECIPITACION	VARIABLE TOPOGRAFICA RANGO					
	R_3K	R_5K	R_10K	R_15K	R_20K	R_15_10K
ENERO	0.60	0.52	0.59	0.59	0.54	0.60
FEBRERO	0.60	0.55	0.60	0.61	0.62	0.61
MARZO	0.69	0.63	<b>0.70</b>	<b>0.72</b>	0.62	<b>0.72</b>
ABRIL	<b>0.75</b>	<b>0.70</b>	<b>0.76</b>	<b>0.77</b>	<b>0.72</b>	<b>0.78</b>
MAYO	<b>0.80</b>	<b>0.76</b>	<b>0.82</b>	<b>0.83</b>	<b>0.77</b>	<b>0.83</b>
JUNIO	<b>0.80</b>	<b>0.76</b>	<b>0.83</b>	<b>0.85</b>	<b>0.82</b>	<b>0.85</b>
JULIO	<b>0.78</b>	<b>0.75</b>	<b>0.82</b>	<b>0.84</b>	<b>0.81</b>	<b>0.83</b>
AGOSTO	<b>0.83</b>	<b>0.80</b>	<b>0.86</b>	<b>0.87</b>	<b>0.85</b>	<b>0.87</b>
SEPTIEMBRE	<b>0.83</b>	<b>0.78</b>	<b>0.84</b>	<b>0.85</b>	<b>0.81</b>	<b>0.85</b>
OCTUBRE	0.65	0.60	0.66	0.66	0.58	0.67
NOVIEMBRE	0.62	0.55	0.63	0.64	0.57	0.65
DICIEMBRE	0.52	0.45	0.56	0.57	0.50	0.58
ANUAL	<b>0.79</b>	<b>0.74</b>	<b>0.81</b>	<b>0.82</b>	<b>0.77</b>	<b>0.82</b>



En las demás variables analizadas tanto topográficas como geográficas, a excepción del Rango y Pendiente, todas tienen una correlación débil con los valores mensuales y anuales de precipitación. Por otro lado, las variables geográficas como la latitud, longitud y distancia a la costa presentan una moderada correlación con valores de  $r$  entre 0.34 y 0.67 para los meses del periodo marzo a septiembre (Ver Tablas 3.5, 3.6, 3.7 y 3.8.)

Para las variables Rango y Pendiente, los coeficientes de correlación están en el intervalo de 0.41 a 0.87, presentando para los meses abril, mayo, junio, julio, agosto y septiembre valores mayores a 0.70 (Ver Tablas 3.4 y 3.5).

**Tabla 3.5: Coeficiente de correlación ( $r$ ) para precipitación, pendiente y aspecto**

PRECIPITACION	VARIABLES TOPOGRAFICAS PENDIENTE Y ASPECTO									
	P_5K	P_10K	P_15K	P_20K	P_15	A_5K	A_10K	A_15K	A_20K	A_15
ENERO	0.58	0.57	0.54	0.52	0.51	0.12	-0.07	-0.20	-0.37	-
FEBRERO	0.65	0.65	0.63	0.61	0.60	0.19	-0.03	-0.20	-0.35	-
MARZO	0.64	0.66	0.65	0.64	0.63	0.24	0.07	-0.10	-0.27	-
ABRIL	<b>0.71</b>	<b>0.72</b>	<b>0.72</b>	<b>0.70</b>	<b>0.70</b>	0.22	-0.01	-0.17	-0.32	-
MAYO	<b>0.75</b>	<b>0.77</b>	<b>0.76</b>	<b>0.75</b>	<b>0.74</b>	0.23	0.05	-0.08	-0.19	-
JUNIO	<b>0.81</b>	<b>0.84</b>	<b>0.84</b>	<b>0.83</b>	<b>0.83</b>	0.31	0.15	-0.01	-0.07	-
JULIO	<b>0.82</b>	<b>0.85</b>	<b>0.85</b>	<b>0.84</b>	<b>0.83</b>	0.32	0.15	-0.02	-0.07	-
AGOSTO	<b>0.84</b>	<b>0.87</b>	<b>0.87</b>	<b>0.86</b>	<b>0.86</b>	0.29	0.13	-0.02	-0.08	-
SEPTIEMB	<b>0.81</b>	<b>0.82</b>	<b>0.81</b>	<b>0.81</b>	<b>0.79</b>	0.22	0.03	-0.10	-0.17	-
OCTUBRE	0.57	0.55	0.54	0.52	0.52	0.03	-0.18	-0.29	-0.46	-
NOVIEMB	0.56	0.57	0.55	0.53	0.52	0.21	0.04	-0.12	-0.32	-
DICIEMB	0.47	0.46	0.44	0.42	0.41	0.05	-0.12	-0.27	-0.44	-
ANUAL	<b>0.77</b>	<b>0.79</b>	<b>0.78</b>	<b>0.77</b>	<b>0.76</b>	0.24	0.06	-0.11	-0.22	-



**Tabla 3.6: Coeficiente de correlación (r) para precipitación y orientación de las microcuencas**

PRECIPITACION	VARIABLE TOPOGRAFICA ORIENTACION DE LA MICROCUENCA EN LAS 8 DIRECCIONES CARDINALES							
	O_NN	O_NE	O_EE	O_SE	O_SS	O_SW	O_WW	O_NW
ENERO	-0.17	-0.17	-0.17	-0.17	-0.13	0.17	0.17	0.17
FEBRERO	-0.16	-0.16	-0.16	-0.16	-0.09	0.16	0.16	0.16
MARZO	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05	-0.13	0.05	0.05	0.05
ABRIL	-0.15	-0.15	-0.15	-0.15	-0.17	0.15	0.15	0.15
MAYO	-0.15	-0.15	-0.15	-0.15	-0.21	0.15	0.15	0.15
JUNIO	-0.07	-0.07	-0.07	-0.07	-0.14	0.07	0.07	0.07
JULIO	-0.06	-0.06	-0.06	-0.06	-0.13	0.06	0.06	0.06
AGOSTO	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.13	0.10	0.10	0.10
SEPTIEMBRE	-0.17	-0.17	-0.17	-0.17	-0.20	0.17	0.17	0.17
OCTUBRE	-0.31	-0.31	-0.31	-0.31	-0.29	0.31	0.31	0.31
NOVIEMBRE	-0.08	-0.08	-0.08	-0.08	-0.12	0.08	0.08	0.08
DICIEMBRE	-0.20	-0.20	-0.20	-0.20	-0.17	0.20	0.20	0.20
ANUAL	-0.13	-0.13	-0.13	-0.13	-0.17	0.13	0.13	0.13

**Tabla 3.7: Coeficiente de correlación (r) para precipitación y variables geográficas**

PRECIPITACION	VARIABLES GEOGRAFICAS				
	X	Y	D_COSTA	D_WEST	D_ORIENTE
ENERO	0.16	0.23	0.16	-0.04	-0.04
FEBRERO	0.16	0.19	0.16	-0.02	-0.07
MARZO	0.39	0.34	0.39	-0.07	-0.27
ABRIL	0.40	0.35	0.40	-0.02	-0.27
MAYO	0.54	0.42	0.54	-0.03	-0.40
JUNIO	0.64	0.45	0.64	-0.04	-0.51
JULIO	0.63	0.46	0.63	-0.06	-0.51
AGOSTO	0.67	0.50	0.67	-0.07	-0.53
SEPTIEMBRE	0.56	0.47	0.56	-0.07	-0.41
OCTUBRE	0.21	0.31	0.21	-0.12	-0.04
NOVIEMBRE	0.27	0.25	0.27	0.01	-0.15
DICIEMBRE	0.12	0.26	0.12	-0.08	0.01
ANUAL	0.51	0.41	0.51	-0.05	-0.36



**Tabla 3.8: Coeficiente de correlación (r) para precipitación y otras variables topográficas**

PRECIPITACION	VARIABLES TOPOGRAFICAS DERIVADAS DE OTRAS VARIABLES					
	IH	I_EXP	Dif_Elev	B_H	D_MAXH	DIR_MAXH
ENERO	-0.07	0.12	0.25	0.23	-0.07	0.07
FEBRERO	0.00	0.12	0.16	0.19	-0.10	0.08
MARZO	-0.12	0.14	0.23	0.29	-0.02	-0.07
ABRIL	-0.13	0.17	0.26	0.32	-0.04	-0.07
MAYO	-0.24	0.23	0.33	0.38	-0.06	-0.08
JUNIO	-0.19	0.24	0.22	0.34	-0.10	-0.12
JULIO	-0.16	0.29	0.23	0.35	-0.08	-0.11
AGOSTO	-0.18	0.28	0.23	0.37	-0.12	-0.14
SEPTIEMBRE	-0.15	0.27	0.30	0.36	-0.10	-0.09
OCTUBRE	-0.18	0.16	0.34	0.35	-0.02	0.09
NOVIEMBRE	-0.16	0.07	0.28	0.25	-0.05	-0.01
DICIEMBRE	-0.10	0.11	0.36	0.28	0.01	0.10
ANUAL	-0.16	0.22	0.28	0.35	-0.08	-0.06

(Portalés, Boronat, Pardo, & Balaguer, 2010) indican que la correlación de una de las variables topográficas o geográficas con la precipitación se entiende mejor cuando se tiene en cuenta el producto con otra de las variables.

Los productos escalares entre la pendiente y rango, aspecto y rango derivados de superficies de influencia con diferentes diámetros, así como también la variable orientación de las microcuencas en su producto escalar con el rango, tienen mejor correlación con la precipitación que como variables individuales, llegando a valores de r en un intervalo de 0.38 a 0.93. Se destacan como los productos que mejor se correlacionan con la precipitación a la pendiente por el rango derivados de los círculos de influencia de radios 5 y 10 kilómetros, con valores de r entre 0.59 y 0.92, y  $r > 0.70$  para precipitación anual y mensual de 8 de los 12 meses y con valores muy cercanos a 0.70 para 3 de los cuatro meses que tienen un  $r < 0.70$  (Ver Tablas 3.9, 3.10, 3.11, 3.12 y 3.13.)



**Tabla 3.9: Coeficiente de correlación (r) para precipitación y productos de variables derivadas de círculo radio 5 km**

PRECIPITACION	VARIABLES TOPOGRAFICAS OBTENIDAS DE CIRCULOS DE INFLUENCIA DE RADIO 5 KM			
	H*P	H*A	P*R	A*R
ENERO	0.43	-0.03	0.66	0.55
FEBRERO	0.54	0.07	0.67	0.58
MARZO	0.45	0.00	<b>0.73</b>	0.68
ABRIL	0.51	-0.03	<b>0.80</b>	<b>0.73</b>
MAYO	0.49	-0.12	<b>0.85</b>	<b>0.78</b>
JUNIO	0.57	-0.02	<b>0.83</b>	<b>0.79</b>
JULIO	0.58	-0.01	<b>0.82</b>	<b>0.78</b>
AGOSTO	0.60	-0.04	<b>0.87</b>	<b>0.82</b>
SEPTIEMBRE	0.57	-0.06	<b>0.87</b>	<b>0.80</b>
OCTUBRE	0.37	-0.17	<b>0.71</b>	0.60
NOVIEMBRE	0.37	-0.04	0.68	0.60
DICIEMBRE	0.31	-0.10	0.59	0.47
ANUAL	0.54	-0.05	<b>0.83</b>	<b>0.76</b>

**Tabla 3.10: Coeficiente de correlación (r) para precipitación y productos de variables derivadas de círculo radio 10 km**

PRECIPITACION	VARIABLES TOPOGRAFICAS OBTENIDAS DE CIRCULOS DE INFLUENCIA DE RADIO 10 KM			
	H*P	H*A	P*R	A*R
ENERO	0.43	-0.16	0.67	0.58
FEBRERO	0.53	-0.05	0.69	0.60
MARZO	0.48	-0.12	<b>0.76</b>	<b>0.72</b>
ABRIL	0.53	-0.17	<b>0.83</b>	<b>0.76</b>
MAYO	0.52	-0.24	<b>0.89</b>	<b>0.83</b>
JUNIO	0.62	-0.12	<b>0.90</b>	<b>0.86</b>
JULIO	0.64	-0.10	<b>0.89</b>	<b>0.85</b>
AGOSTO	0.65	-0.13	<b>0.92</b>	<b>0.88</b>
SEPTIEMBRE	0.61	-0.16	<b>0.91</b>	<b>0.84</b>
OCTUBRE	0.37	-0.32	<b>0.71</b>	0.63
NOVIEMBRE	0.38	-0.18	<b>0.70</b>	0.64
DICIEMBRE	0.31	-0.22	0.61	0.54
ANUAL	0.58	-0.17	<b>0.88</b>	<b>0.82</b>



**Tabla 3.11: Coeficiente de correlación (r) para precipitación y productos de variables derivadas de círculo radio 15 km**

PRECIPITACION	VARIABLES TOPOGRAFICAS OBTENIDAS DE CIRCULOS DE INFLUENCIA DE RADIO 15 KM			
	H*P	H*A	P*R	A*R
ENERO	0.44	-0.18	0.65	0.56
FEBRERO	0.54	-0.10	0.69	0.58
MARZO	0.50	-0.19	<b>0.75</b>	<b>0.71</b>
ABRIL	0.56	-0.22	<b>0.82</b>	<b>0.75</b>
MAYO	0.55	-0.29	<b>0.88</b>	<b>0.82</b>
JUNIO	0.64	-0.20	<b>0.91</b>	<b>0.85</b>
JULIO	0.66	-0.17	<b>0.90</b>	<b>0.84</b>
AGOSTO	0.67	-0.20	<b>0.93</b>	<b>0.87</b>
SEPTIEMBRE	0.64	-0.19	<b>0.90</b>	<b>0.84</b>
OCTUBRE	0.39	-0.34	0.68	0.62
NOVIEMBRE	0.40	-0.24	0.69	0.63
DICIEMBRE	0.34	-0.23	0.59	0.53
ANUAL	0.60	-0.23	<b>0.88</b>	<b>0.81</b>

**Tabla 3.12: Coeficiente de correlación (r) para precipitación y productos de variables derivadas de círculo radio 20 km**

PRECIPITACION	VARIABLES TOPOGRAFICAS OBTENIDAS DE CIRCULOS DE INFLUENCIA DE RADIO 20 KM			
	H*P	H*A	P*R	A*R
ENERO	0.42	-0.28	0.60	0.49
FEBRERO	0.52	-0.21	0.67	0.57
MARZO	0.49	-0.28	0.68	0.58
ABRIL	0.56	-0.29	<b>0.78</b>	0.68
MAYO	0.56	-0.32	<b>0.83</b>	<b>0.75</b>
JUNIO	0.65	-0.23	<b>0.88</b>	<b>0.81</b>
JULIO	0.68	-0.19	<b>0.87</b>	<b>0.81</b>
AGOSTO	0.69	-0.21	<b>0.90</b>	<b>0.84</b>
SEPTIEMBRE	0.65	-0.21	<b>0.87</b>	<b>0.80</b>
OCTUBRE	0.39	-0.38	0.62	0.51
NOVIEMBRE	0.39	-0.34	0.63	0.52
DICIEMBRE	0.33	-0.29	0.54	0.43
ANUAL	0.61	-0.27	<b>0.83</b>	<b>0.75</b>



Cuando se habló de los Regímenes de Precipitación en el Capítulo 2, entre otras cosas se dijo que las precipitaciones sobre el área de estudio estaban influenciadas por el ITCZ (*Intertropical Convergence Zone*) y por los vientos húmedos producidos en la cuenca del Amazonas que entran en el área de estudio a través del cañón formado por el Río Paute al cruzar de la Cordillera Oriental hacia la cuenca baja del Amazonas y que la precipitación era del tipo orográfica (Céleri, 2007).

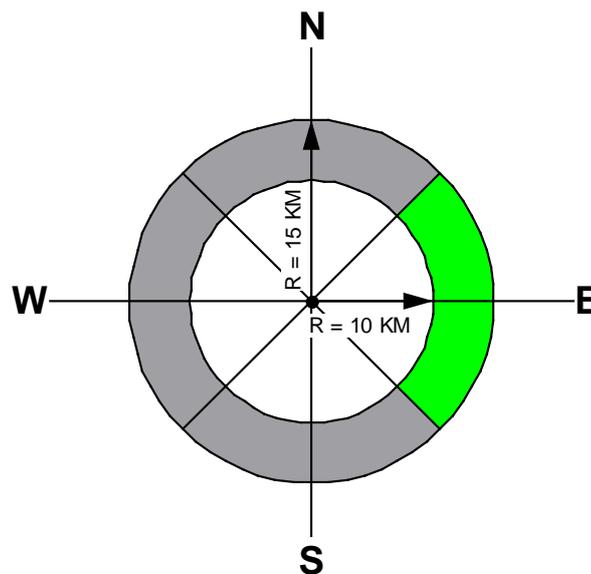
**Tabla 3.13: Coeficiente de correlación (r) para precipitación y productos de la orientación y rango derivado de círculo radio 5 km**

PRECIPITACION	ORIENTACION DE LA MICROCUENCA EN LAS 8 DIRECCIONES CARDINALES MULTIPLICADA POR EL RANGO DN UN CIRCULO DE RADIO 5 KM							
	O*R_N N	O*R_N E	O*R_E E	O*R_ SE	O*R_ SS	O*R_S W	O*R_W W	O*R_N W
ENERO	0.48	0.44	0.37	0.19	0.05	0.67	0.69	0.67
FEBRERO	0.42	0.39	0.33	0.16	0.06	0.60	0.61	0.59
MARZO	0.57	0.54	0.49	0.33	0.09	0.61	0.68	0.68
ABRIL	0.52	0.49	0.43	0.26	0.04	0.64	0.68	0.67
MAYO	0.55	0.51	0.44	0.26	0.02	0.68	<b>0.72</b>	<b>0.71</b>
JUNIO	0.55	0.52	0.46	0.31	0.11	0.59	0.65	0.66
JULIO	0.56	0.53	0.47	0.32	0.13	0.59	0.65	0.66
AGOSTO	0.54	0.52	0.46	0.29	0.12	0.62	0.67	0.67
SEPT	0.57	0.54	0.46	0.27	0.08	<b>0.72</b>	<b>0.76</b>	<b>0.75</b>
OCT	0.38	0.34	0.26	0.06	-0.15	0.69	0.66	0.63
NOV	0.54	0.51	0.45	0.28	0.07	0.62	0.67	0.67
DIC	0.48	0.45	0.38	0.19	0.02	0.67	0.69	0.67
ANUAL	0.56	0.52	0.46	0.28	0.07	0.67	<b>0.72</b>	<b>0.71</b>

El producto escalar entre la pendiente y el rango, puede entenderse como una amplificación o maximización de cualesquiera de las dos variables, por cuanto a un mayor rango corresponde una mayor pendiente y viceversa. La alta correlación positiva encontrada entre este producto y la precipitación puede ser entendida y explicada porque en las zonas montañosas (pendientes/rangos fuertes) la precipitación media mensual

es mayor que en las zonas de los valles (pendientes/rangos suaves) dentro del área de estudio, así por ejemplo en la estación M141 El Labrado ubicada en zona de montaña el rango es grande y el valor de precipitación es alto, en tanto que para M067 Cuenca Aeropuerto ubicada en el valle interandino, el rango es pequeño y el valor de la precipitación es bajo.

Considerando que los vientos húmedos del Amazonas ingresan al área de estudio desde la dirección Este, la cordillera Oriental sería una barrera topográfica para el avance de la humedad hacia el interior de la cuenca y si revisamos que la correlación entre la altura de un trapecio circular con radios exterior e interior de 15 y 10 kilómetros en las 8 direcciones cardinales es moderada para las direcciones Este y Sureste, podemos asumir para este trabajo como barrera topográfica que influye en los valores de precipitación a la altura media del mencionado trapecio circular en la dirección Este con un ángulo de apertura de 90 grados (ver Figura 3.1).



**Figura 3.1: Trapecio circular en dirección Este**



Si se define como Índice Orográfico 1 ( $IO_1$ ) al producto escalar de la Pendiente por el Rango derivados del círculo de influencia de radio 5 kilómetros, dividido para la barrera topográfica definida como la altura media del trapecio circular (radios 15 y 10 km) en la dirección Este ( $H_{15\_10EE}$ ).  $IO_1$  matemáticamente queda definido por la siguiente expresión:

$$IO_1 = (P_{5K} - R_{5K})/H_{15\_10EE} \quad (3.1)$$

Obtenemos el coeficiente de Pearson para la correlación entre la precipitación mensual y el  $IO_1$ , el cual da valores muy altos de correlación, como se puede apreciar en la columna 2 de la Tabla 3.14. Sin embargo si analizamos las figuras de  $IO_1$  vs. precipitación media mensual y anual, se puede ver que hay valores de precipitación que están muy distanciados de los demás datos, correspondiendo estos a las estaciones M206 y M217 ubicadas en la parte baja de la cuenca estudiada, lo cual en ciertos casos influencia notoriamente el grado de la correlación (ver Figura 3.2) al producirse un efecto palanca (*levelling*). Para analizar el efecto de estas estaciones se realizó un nuevo escenario de correlación de la serie de datos excluyendo los datos de estas estaciones (ver Figura 3.3 y Tabla 3.14).

En la columna 3 de la Tabla 3.14 se muestra que la correlación entre  $IO_1$  y precipitación mensual es prácticamente inexistente para los meses de enero, febrero, marzo, octubre, noviembre y diciembre con valores absolutos de  $r$  menores a 0.26, en tanto que para los demás meses  $r$  supera el valor de 0.70. Este escenario de correlación evidencia que el  $IO_1$  explica la precipitación en toda el área de estudio únicamente para valores mensuales en el período mayo– septiembre y para el valor medio anual, en tanto que para los meses restantes el Índice Orográfico 1 explica la precipitación únicamente en la zona de influencia de las estaciones M206 y M217 (parte baja de la zona este de la cuenca



estudiada). Este comportamiento de la correlación se da con todas las variables topográficas y geográficas y sus productos escalares estudiados.

**Tabla 3.14: Coeficiente de correlación (r) para IO<sub>1</sub> y precipitación**

PRECIPITACION	Serie de Datos	
	Completa	Sin extremos
ENERO	<b>0.72</b>	0.00
FEBRERO	<b>0.73</b>	0.14
MARZO	<b>0.79</b>	0.20
ABRIL	<b>0.87</b>	0.39
MAYO	<b>0.93</b>	<b>0.71</b>
JUNIO	<b>0.93</b>	<b>0.80</b>
JULIO	<b>0.91</b>	<b>0.79</b>
AGOSTO	<b>0.94</b>	<b>0.86</b>
SEPTIEMBRE	<b>0.94</b>	<b>0.76</b>
OCTUBRE	<b>0.78</b>	0.12
NOVIEMBRE	<b>0.75</b>	-0.09
DICIEMBRE	<b>0.67</b>	-0.26
ANUAL	<b>0.92</b>	0.63

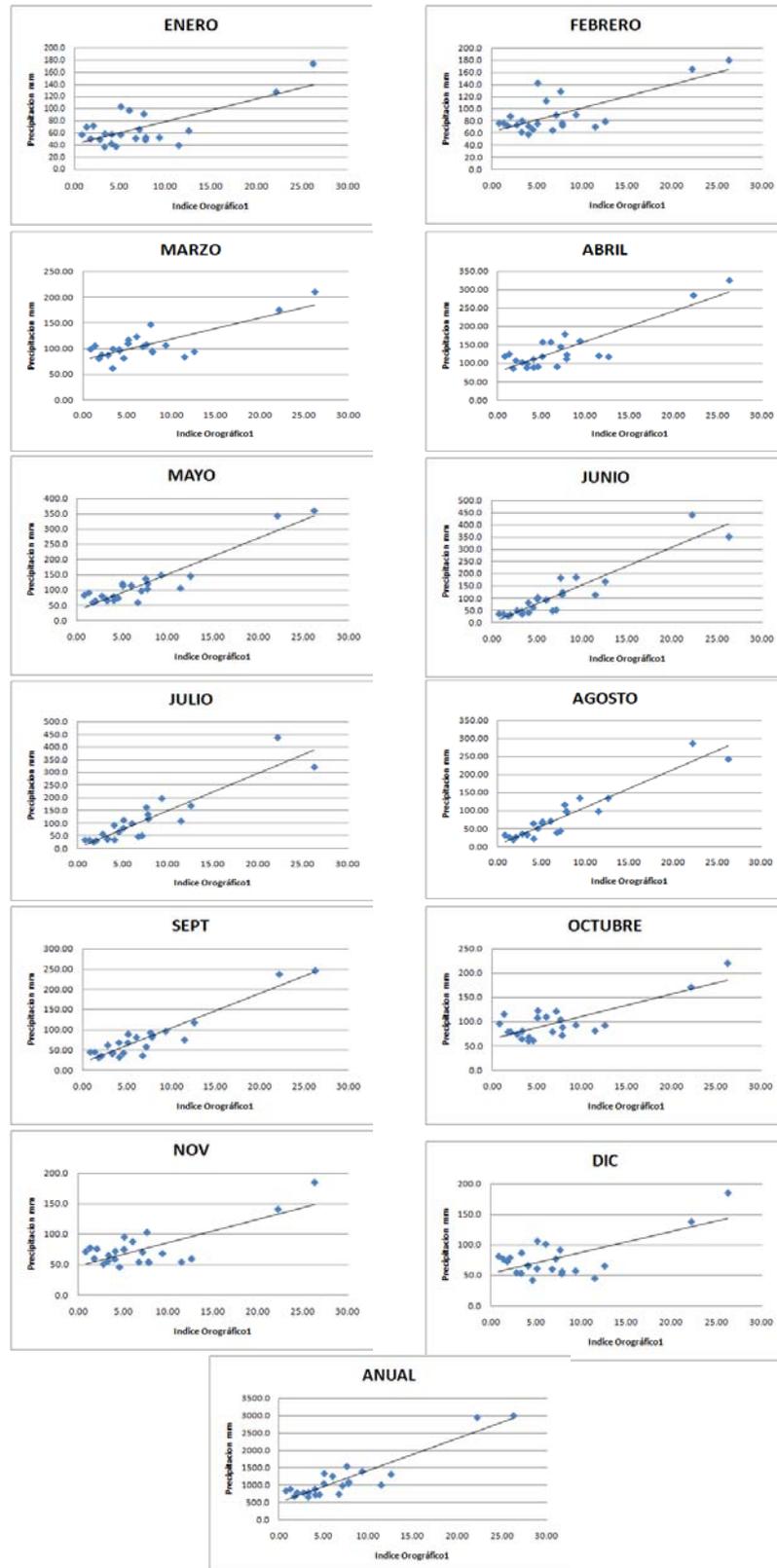


Figura 3.2: Correlogramas precipitación vs IO<sub>1</sub> serie completa

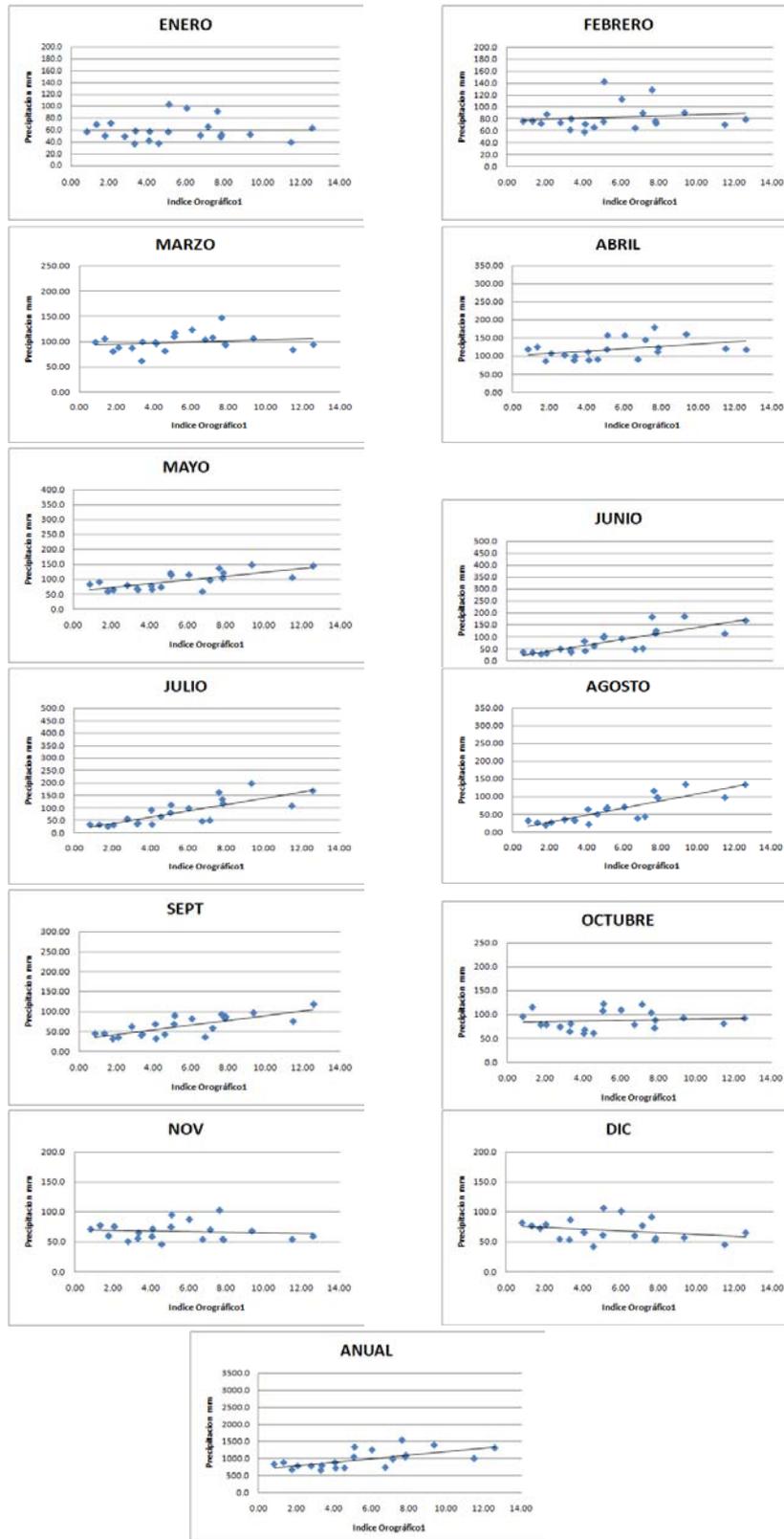


Figura 3.3: Correlogramas precipitación vs IO<sub>1</sub> sin M206 y M207



Manteniendo el criterio de buscar un índice orográfico que se correlacione de mejor manera con la precipitación, se ha probado todos los productos escalares y combinaciones de todas las variables derivadas de la topografía y geografía, resultando que únicamente una combinación de las variables altura media y rango obtenidas del círculo de influencia de radio 5 kilómetros ( $H_{5K}$  y  $R_{5K}$ ) y la introducción de una nueva variable que denominaremos altura de la cordillera oriental (HCO) definida como la altura media de la línea que une los picos de la cordillera Oriental en una longitud de 5 kilómetros y en dirección Este del punto al cual se le relaciona, y al cual denominamos Índice Orográfico 2 ( $IO_2$ ), da correlaciones aceptables para los meses no explicados por  $IO_1$ , tanto para la serie completa de datos, cuanto para la serie sin los valores de las estaciones M206 y M217 (ver Tabla 3.15 y Figuras 3.4 y 3.5).

$IO_2$  matemáticamente queda definido por la siguiente expresión:

$$IO_2 = (H_{5K} - HCO)R_{5K} \quad (3.2)$$

Esta expresión combina 2 elementos orográficos que son (i) el efecto barrera de la cordillera y (ii) la ubicación en la cuenca de la estación estudiada.

El efecto barrera viene determinado por la expresión ( $H_{5K} - HCO$ ), y consiste en estimar qué tan grande es el bloqueo del movimiento de los vientos húmedos provenientes del Amazonas, así por ejemplo para la estación M417 Piscícola Chirimachay ubicada en la zona alta de la cuenca, el efecto barrera tiene un valor positivo indicando que el bloqueo por parte de la cordillera Oriental no es grande y en consecuencia las precipitaciones en este sitio son altas, en tanto que para la estación M138 Paute ubicada en el valle interandino, el efecto barrera tiene un valor negativo indicando que el bloqueo de la cordillera Orientales si es una barrera y en consecuencia las precipitaciones en este sitio son bajas.



Evidenciando que existe una relación directamente proporcional entre este efecto barrera y la precipitación en el área de estudio.

Por otro lado, la ubicación de la estación en el paisaje podría ser en valles o montaña, y para eso se usa el rango topográfico de la zona de influencia en un radio de 5 kilómetros de la estación de medición (R\_5K), al igual que en IO<sub>1</sub> el rango define a zonas montañosas (rangos fuertes) y zonas de los valles (rangos suaves).

Entonces la combinación de zona de valle con barrera alta nos daría sitios con bajas precipitaciones, por otro lado, la combinación de zona de montaña con una pequeña barrera nos da altas precipitaciones, que es lo que se observa en la cuenca.

Entonces este indicado IO<sub>2</sub> nos permite combinar estos 2 efectos y convertirse en un estimador muy conveniente para nuestra realidad.

**Tabla 3.15: Coeficiente de correlación (r) para IO<sub>2</sub> y Precipitación**

PRECIPITACION	Serie de Datos	
	Completa	Sin extremos
ENERO	<b>0.75</b>	<b>0.76</b>
FEBRERO	0.67	0.64
MARZO	0.58	0.42
ABRIL	0.56	0.43
MAYO	0.45	0.21
JUNIO	0.32	0.03
JULIO	0.29	0.03
AGOSTO	0.30	-0.02
SEPTIEMBRE	0.48	0.30
OCTUBRE	0.64	0.53
NOVIEMBRE	0.65	0.58
DICIEMBRE	<b>0.75</b>	<b>0.78</b>
ANUAL	0.50	0.36

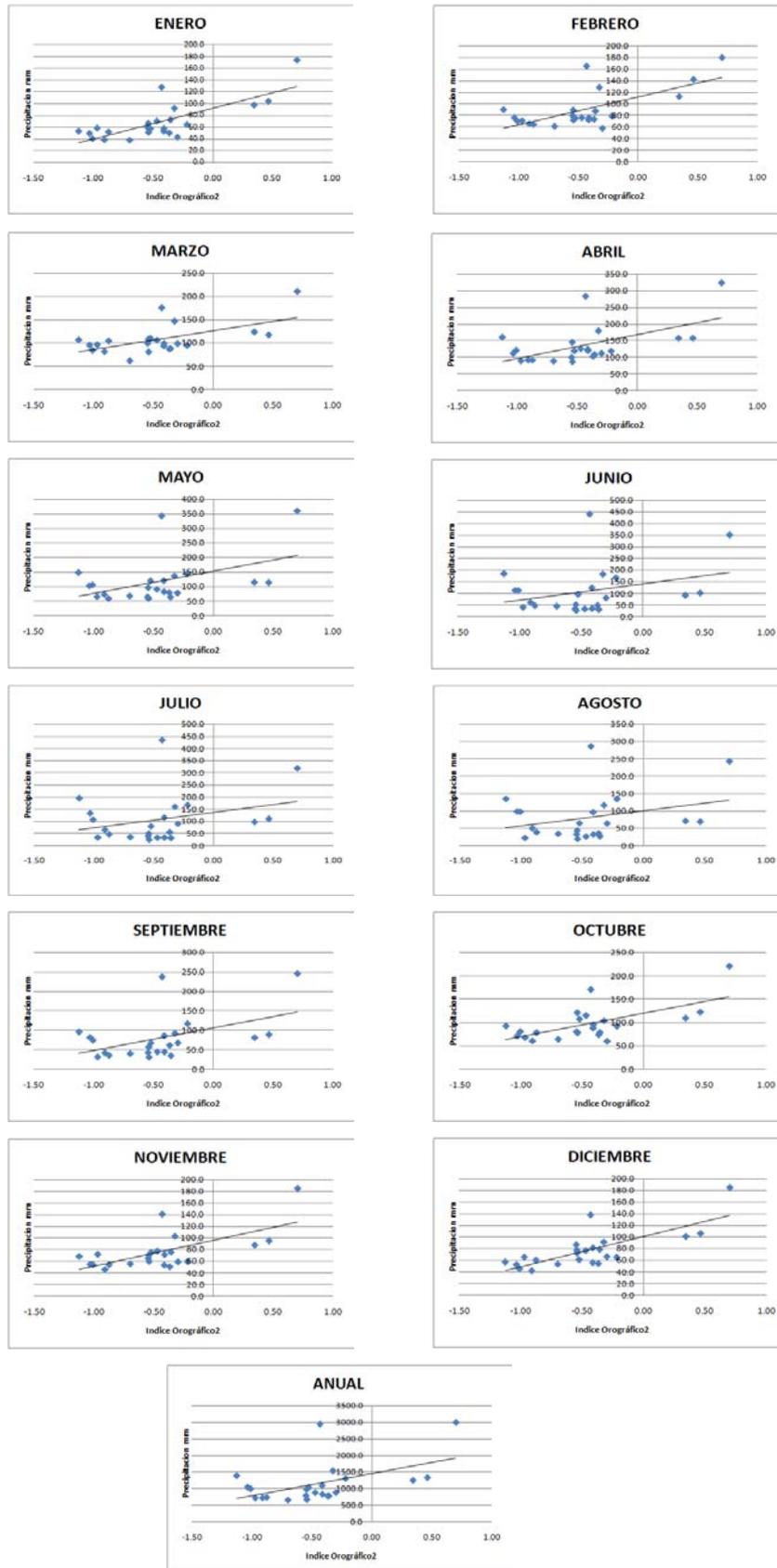


Figura 3.4: Correlogramas precipitación Vs IO<sub>2</sub> serie completa

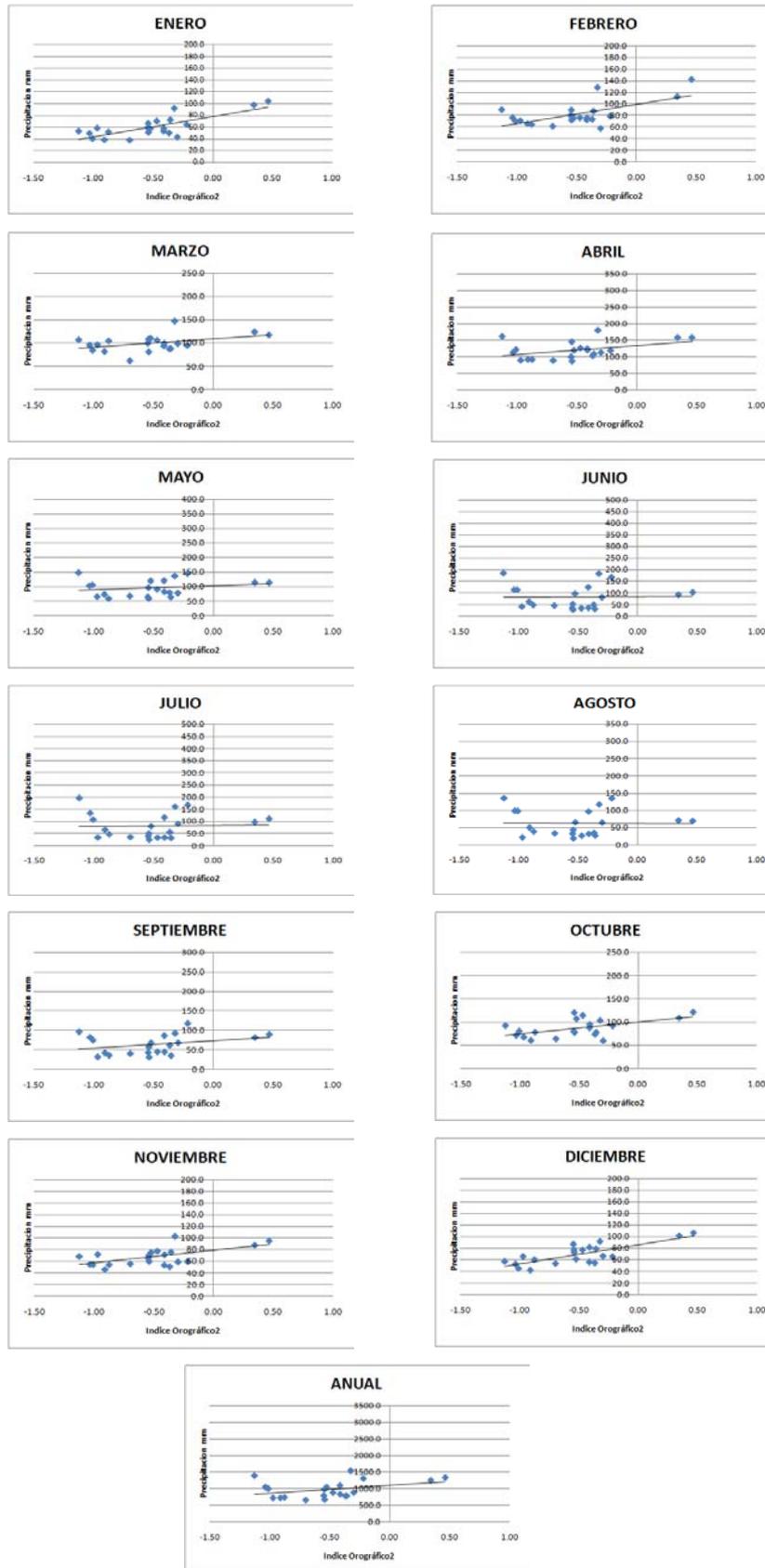


Figura 3.5: Correlogramas precipitación vs IO<sub>2</sub> sin M206 Y M207



Para la aplicación de un auxiliar de interpolación de la precipitación en el método cokriging utilizaremos a  $IO_1$  para los meses de mayo, junio, julio, agosto y septiembre en tanto que  $IO_2$  servirá para los meses de enero, febrero, marzo, abril, octubre, noviembre y diciembre;  $IO_1$  se usará también para la interpolación de la precipitación media anual. Con la ayuda de un SIG se calculó  $IO_1$  e  $IO_2$  para 5392 puntos ubicados dentro del área de estudio, distribuidos con un espaciamiento de un kilómetro en la dirección norte y este.

## 3.2 Comparación de métodos de interpolación

### 3.2.1 Modelos de semivariogramas teóricos aplicados

Por definición de semivariograma  $\gamma(0)=0$  pero en la práctica el semivariogramamuestral  $\gamma^*(h)$  cuando  $h$  tiende a cero no necesariamente se anula. Esto es conocido como efecto "*nugget*" o pepita, y el valor del semivariograma en cero  $\gamma(0)$  es conocido como la varianza "*nugget*" o microvarianza (Diaz Viera, 2002). Un *nugget* es causado por discontinuidades climáticas en distancias cortas como una consecuencia de la discontinuidad geográfica; correspondería a una caída súbita en la correlación (Bacchi & Kottegoda, 1994). Un efecto *nugget* con valor próximo a cero indica que la correlación espacial dentro del rango es fuerte (Akhtari, Morid, & Hossai, 2009). En el presente estudio, cuando se modelen los semivariogramas, estos tendrán valores de "*nugget*" iguales o cercanos a cero para así minimizar el error causado por los datos y el modelo.

Para validar los modelos teóricos obtenidos de semivariogramas se puede proceder de varias maneras. Un método sencillo y eficaz es el de Validación Cruzada, con valores obtenidos en los puntos conocidos utilizando kriging con el modelo obtenido de semivariograma (ejemplo (Bacchi & Kottegoda, 1994) y (Diaz Viera, 2002)); la idea central del



método es que si el modelo del semivariograma refleja adecuadamente la estructura espacial implícita en el conjunto de datos, entonces los valores estimados deben ser cercanos a los valores observados; esta validación de proximidad puede ser caracterizada con los estadígrafos Media del Error (ME), Raíz de la Media del Error Cuadrado (RMS), Media Estandarizada del Error (MS). (Ver sección 2.3.4.5 del Capítulo 2).

En este trabajo se ha modelado los semivariogramas simples y cruzados, para una sola variable y para dos variables respectivamente, aplicando los diferentes modelos teóricos presentados en 2.3.4.3 del Capítulo 2 y se han validado aplicando los estadígrafos ME, RMS y MS a los resultados de la Validación Cruzada, escogiendo el modelo que mejores estadígrafos presenta. En la Tabla 3.16 se presentan los resultados de modelos de semivariogramas simples para su uso en la técnica kriging y en la Tabla 3.17 los resultados de los modelos de semivariogramas simples y cruzados para su uso en la técnica cokriging.

Como se puede apreciar en las Tablas 3.16 y 3.17, los modelos teóricos de semivariogramas que mejores estadígrafos presentaron son aquellos modelados con valores de “*nugget*” iguales a cero minimizando de esta forma el error causado por los datos y la modelación. Los modelos que mejor se ajustaron a los semivariogramas son del tipo Esférico para aplicar kriging y cokriging en la estimación espacial de precipitación mensual y anual, con la excepción del mes de Diciembre en aplicación de kriging, en el cual el mejor modelo corresponde al tipo Gausiano con “*nugget*” igual a cero.



**Tabla 3.16: Modelos teóricos de semivariogramas simples**

PRECIPITACION MEDIA	PARAMETROS DEL MODELO TEORICO				VALIDACION		
	TIPO	RANGO	MESETA (SILL)	PEPITA (NUGGET)	ME	RMS	MS
ENERO	ESFERICO	45000	1500	0	-0.45	24.88	-
FEBRERO	ESFERICO	59266	1608	0	-0.46	22.72	-
MARZO	ESFERICO	24500	750	0	-1.04	23.28	-
ABRIL	ESFERICO	24900	1833	0	-1.29	34.64	-
MAYO	ESFERICO	35000	2810	0	-0.10	34.54	-
JUNIO	ESFERICO	42000	8035	0	0.60	51.77	-
JULIO	ESFERICO	32500	6430	0	0.15	51.60	-
AGOSTO	ESFERICO	44000	2410	0	0.56	27.85	0.001
SEPTIEMBRE	ESFERICO	25000	872.5	0	-1.32	24.08	-
OCTUBRE	ESFERICO	45000	1760	0	0.25	24.19	0.003
NOVIEMBRE	ESFERICO	24500	716	0	-0.71	22.52	-
DICIEMBRE	GAUSIANO	25000	957	0	0.24	19.96	0.018
ANUAL	ESFERICO	48500	307800	0	-0.37	315.73	-

**Tabla 3.17: Modelos teóricos de semivariogramas simples y cruzados**

PRECIPI- TACION MEDIA	PARAMETROS DEL MODELO TEORICO				VALIDACION		
	TIPO	RANGO	MESETA (SILL)	PEPITA (NUGGET)	ME	RMS	MS
ENERO	ESF. (1)	40000	1161.40	0.000	0.63	22.69	0.04
	ESF. (2)	40000	1.04				
	ESF. (3)	40000	0.12	0.000			
FEBRERO	ESF. (1)	48000	1200.00	0.000	0.18	22.11	0.02
	ESF. (2)	48000	1.09				
	ESF. (3)	48000	0.20	0.000			
MARZO	ESF. (1)	45000	1710.00	0.000	-1.48	25.40	-0.04
	ESF. (2)	45000	-0.95				
	ESF. (3)	45000	0.24	0.000			
ABRIL	ESF. (1)	55000	4150.00	0.000	-0.77	34.51	-0.02
	ESF. (2)	55000	-1.23				
	ESF. (3)	55000	0.37	0.000			
MAYO	ESF. (1)	45000	5500.00	0.000	-2.84	38.23	-0.08
	ESF. (2)	45000	289.31				
	ESF. (3)	45000	32.00	0.000			



JUNIO	ESF. (1)	55000	13000.00	0.000	-1.27	55.34	-0.03
	ESF. (2)	55000	334.46				
	ESF. (3)	55000	40.00	0.000			
JULIO	ESF. (1)	48000	48000.00	0.000	-2.94	56.36	-0.06
	ESF. (2)	48000	384.06				
	ESF. (3)	48000	35.00	0.000			
AGOSTO	ESF. (1)	48000	4150.00	0.000	-2.01	31.15	-0.08
	ESF. (2)	48000	275.55				
	ESF. (3)	48000	35.00	0.000			
SEPTIEMBRE	ESF. (1)	45000	2727.00	0.000	-3.17	27.53	-0.11
	ESF. (2)	45000	222.65				
	ESF. (3)	45000	32.00	0.000			
OCTUBRE	ESF. (1)	48000	1712.00	0.000	0.87	22.96	0.03
	ESF. (2)	48000	0.82				
	ESF. (3)	48000	0.18	0.000			
NOVIEMBRE	ESF. (1)	48500	1222.00	0.000	0.59	20.94	0.04
	ESF. (2)	48500	2.00				
	ESF. (3)	48500	0.25	0.000			
DICIEMBRE	ESF. (1)	24800	440.00	0.000	1.27	18.46	0.08
	ESF. (2)	24800	2.00				
	ESF. (3)	24800	0.12	0.000			
ANUAL	ESF. (1)	49000	348000.00	0.000	-10.73	327.53	-0.03
	ESF. (2)	49000	1000.00				
	ESF. (3)	49000	35.00	0.000			

ESF. (1): Modelo Esférico, semivariograma simple, variable precipitación

ESF. (2): Modelo Esférico, semivariograma cruzado, variables precipitación e índices orográficos

ESF. (3): Modelo Esférico, semivariograma simple, variable índice orográfico

### 3.2.2 Comparación de métodos de interpolación

Aplicando el método clásico de Thiessen (TH) y los métodos de interpolación el peso del inverso de la distancia (IDW), kriging ordinario (KO) y cokriging (CK), se obtuvo la precipitación espacial sobre el área de estudio para valores medio mensual y medio anual en el período 1975 – 1989.



Para aplicar KO se utilizaron los modelos teóricos de los semivariogramas simples de la Tabla 3.16, en tanto que para aplicar CK se utilizaron los modelos de los semivariogramas simples y cruzados presentados en la Tabla 3.17. Para aplicar IDW se buscó el modelo que mejores estadígrafos en validación cruzada (como ME, MAE y RMS) presenten en función de variar el grado de la potencia de la formulación matemática del método, resultando que los mejores modelos de IDW corresponden a valores de potencias ( $\beta$ ) entre 3.0 y 4.0 y no los modelos con potencia de 2.0 que es la común, coincidiendo con resultados similares obtenidos en estudios realizados por (Portalés, Boronat, Pardo, & Balaguer, 2010), (Mair & Fares, 2011), (Mutua, 2012). Ver la Tabla 3.18.

Se puede apreciar en la Tabla 3.19 que todos los métodos dan un estimado muy similar de la precipitación promedio mensual y promedio anual sobre toda el área de estudio.

Para valores mínimos y máximos, TH e IDW presentan valores iguales a los datos extremos observados en las series mensuales de precipitación de las estaciones utilizadas. Los métodos OK y CK presentan valores mínimos inferiores a los de TH e IDW para todos los meses, notando que para el periodo mayo a septiembre estos valores estimados son proporcionalmente más bajos en un orden del 10 al 44% para OK y del 23 al 49% para CK, siendo CK el método que da los valores mínimos más bajos, como se aprecia en la Tabla 3.20. Para valores máximos, todos los métodos dan valores similares, con excepción de los meses mayo, agosto y septiembre en los cuales CK presenta valores mayores en el orden del 15 al 21% a los obtenidos por los otros métodos, como se aprecia en la Tabla 3.21.



**Tabla 3.18: Valores de estadígrafos y determinación de potencia para mejor modelo de IDW**

PRECIPITACION	ESTADIGRAFOS	MODELOS IDW		
		POTENCIA		Valor de Potencia
		2.0	P	
ENERO	ME	<b>0.13</b>	-1.23	3.50
	RMS	25.97	<b>23.75</b>	
	MAE (%)	30.65	<b>28.76</b>	
FEBRERO	ME	1.21	<b>-0.69</b>	4.00
	RMS	26.12	<b>22.79</b>	
	MAE (%)	21.19	<b>18.99</b>	
MARZO	ME	<b>0.15</b>	-0.57	3.00
	RMS	25.51	<b>23.83</b>	
	MAE (%)	17.64	<b>17.12</b>	
ABRIL	ME	<b>0.18</b>	-3.34	4.00
	RMS	41.30	<b>35.39</b>	
	MAE (%)	23.93	<b>22.27</b>	
MAYO	ME	<b>2.13</b>	6.78	4.00
	RMS	46.40	<b>34.36</b>	
	MAE (%)	31.35	<b>28.19</b>	
JUNIO	ME	<b>1.16</b>	8.05	4.00
	RMS	62.79	<b>56.01</b>	
	MAE (%)	42.35	<b>41.80</b>	
JULIO	ME	<b>0.63</b>	7.19	4.00
	RMS	61.96	<b>56.93</b>	
	MAE (%)	43.68	<b>40.96</b>	
AGOSTO	ME	<b>0.64</b>	5.22	4.00
	RMS	37.43	<b>32.02</b>	
	MAE (%)	38.24	<b>37.26</b>	
SEPTIEMBRE	ME	<b>0.34</b>	-3.21	4.00
	RMS	31.37	<b>23.86</b>	
	MAE (%)	32.01	<b>28.81</b>	
OCTUBRE	ME	<b>1.86</b>	3.31	4.00
	RMS	27.92	<b>24.72</b>	
	MAE (%)	23.73	<b>22.89</b>	
NOVIEMBRE	ME	<b>0.29</b>	1.61	3.50
	RMS	25.17	<b>22.80</b>	
	MAE (%)	26.23	<b>25.24</b>	
DICIEMBRE	ME	<b>-0.02</b>	-0.92	3.40
	RMS	25.03	<b>22.52</b>	
	MAE (%)	25.45	<b>23.49</b>	
ANUAL	ME	<b>-4.73</b>	-42.58	4.00
	RMS	393.82	<b>316.29</b>	
	MAE (%)	25.14	<b>23.60</b>	



**Tabla 3.19: Valores de precipitación media mensual sobre el área de estudio**

MES	TH	IDW	KO	CK
ENERO	64.44	65.24	65.16	65.28
FEBRERO	86.69	86.94	87.87	87.62
MARZO	102.14	103.19	102.70	102.69
ABRIL	127.38	128.20	127.46	128.22
MAYO	103.65	104.96	103.97	104.50
JUNIO	91.55	92.60	91.47	92.64
JULIO	90.87	91.59	89.37	90.89
AGOSTO	68.49	68.99	68.56	68.52
SEPTIEMBRE	70.21	70.63	69.11	69.75
OCTUBRE	91.44	92.23	92.08	92.16
NOVIEMBRE	71.29	72.21	72.12	72.44
DICIEMBRE	73.75	74.59	74.28	74.87

**Tabla 3.20: Valores de precipitación mínima mensual sobre el área de estudio**

MES	TH	IDW	KO	CK
ENERO	37.70	37.70	36.81	35.95
FEBRERO	57.04	57.04	53.98	54.11
MARZO	62.09	62.09	62.20	62.20
ABRIL	86.24	86.24	83.55	85.22
MAYO	58.92	58.92	53.15	45.45
JUNIO	27.18	27.18	21.10	20.33
JULIO	24.45	24.45	13.62	12.54
AGOSTO	19.25	19.25	14.83	11.03
SEPTIEMBRE	31.75	31.75	26.40	21.45
OCTUBRE	59.78	59.78	58.97	58.16
NOVIEMBRE	45.99	45.99	46.05	46.07
DICIEMBRE	42.26	42.26	36.08	42.33



**Tabla 3.21: Valores de precipitación máxima mensual sobre el área de estudio**

MES	TH	IDW	KO	CK
ENERO	174.20	174.20	173.95	181.39
FEBRERO	180.39	180.39	180.33	185.89
MARZO	210.15	210.15	209.90	218.17
ABRIL	324.63	324.63	324.36	331.47
MAYO	361.07	361.07	361.05	426.72
JUNIO	441.12	441.12	439.98	463.18
JULIO	435.98	435.98	434.90	474.96
AGOSTO	286.28	286.28	285.72	329.61
SEPTIEMBRE	246.47	246.47	246.43	298.99
OCTUBRE	219.88	219.88	219.62	220.38
NOVIEMBRE	184.72	184.72	184.39	192.06
DICIEMBRE	184.62	184.62	195.41	199.89

Para la precipitación anual, se puede apreciar en la Tabla 3.22 que los valores de precipitación media sobre el área de estudio obtenida por todos los métodos tienen valores bastante similares; para valores mínimos TH e IDW presentan el mismo valor en tanto que KO y CK presentan valores similares pero un 4% menores a los de TH e IDW; para valores máximos todos los métodos dan valores muy similares, evidenciándose que TH, IDW y OK prácticamente tienen el mismo valor y CK difiere de los demás métodos en apenas un 5%.

**Tabla 3.22: Valores de precipitación anual sobre el área de estudio**

METODO	PRECIPITACION (mm)		
	MINIMO	MAXIMO	MEDIA
TH	646.20	3000.30	1041.87
IDW	646.20	3000.30	1050.69
KO	626.82	3003.58	1048.75
CK	627.39	3137.47	1049.53



Para evaluar los resultados de la interpolación se utilizó el método de la Validación Cruzada, computándose estadísticos como la Media del Error (ME), la Media del Error Absoluto (MAE), la Raíz Cuadrada de la Media del Error Cuadrado (RMS) para todos los métodos. Para los métodos geoestadísticos además se calculó la Media Estandarizada del Error (MS), la Raíz Cuadrada de la Media del Error Estandarizado al Cuadrado (RMSS) y la Media del error Estandarizado de kriging (ASE).

Los valores más cercanos a cero de ME corresponden a los métodos geoestadísticos, con excepción de los meses marzo y septiembre que son dados por IDW y TH respectivamente. Ver Tabla 3.23

Los valores más bajos de RMS corresponden a los métodos geoestadísticos, con excepción de los meses mayo y septiembre que son obtenidos por TH (Ver Tabla 3.24.). Los valores más bajos de MAE también corresponden a los métodos geoestadísticos, con excepción del mes de enero que es dado por TH (Ver Tabla 3.25.).

**Tabla 3.23: Valores de ME**

MES	TH	IDW	KO	CK
ENERO	1.29	-1.23	<b>-0.45</b>	0.63
FEBRERO	1.36	-0.69	-0.46	<b>0.18</b>
MARZO	2.74	<b>-0.57</b>	-1.04	-1.48
ABRIL	0.81	-3.34	-1.29	<b>-0.77</b>
MAYO	-0.60	6.78	<b>-0.10</b>	-2.84
JUNIO	-3.12	8.05	<b>0.60</b>	-1.27
JULIO	-3.69	7.19	<b>0.15</b>	-2.94
AGOSTO	-3.29	5.22	<b>0.56</b>	-2.01
SEPTIEMBRE	<b>0.99</b>	-3.21	-1.32	-3.17
OCTUBRE	1.46	3.31	<b>0.25</b>	0.87
NOVIEMBRE	1.11	1.61	-0.71	<b>0.59</b>
DICIEMBRE	1.44	-0.92	<b>0.24</b>	1.27



**Tabla 3.24: Valores de RMS**

MES	TH	IDW	KO	CK
ENERO	24.76	23.75	24.88	<b>22.69</b>
FEBRERO	23.79	22.79	22.72	<b>22.11</b>
MARZO	26.12	23.83	<b>23.28</b>	25.40
ABRIL	35.55	35.39	34.64	<b>34.51</b>
MAYO	<b>29.48</b>	34.36	34.54	38.23
JUNIO	54.19	56.01	<b>51.77</b>	55.34
JULIO	54.97	56.93	<b>51.60</b>	56.36
AGOSTO	33.45	32.02	<b>27.85</b>	31.15
SEPTIEMBRE	<b>22.18</b>	23.86	24.08	27.53
OCTUBRE	25.96	24.72	24.19	<b>22.96</b>
NOVIEMBRE	23.99	22.80	22.52	<b>20.94</b>
DICIEMBRE	22.83	22.52	19.96	<b>18.46</b>

**Tabla 3.25: Valores de MAE (%)**

MES	TH	IDW	KO	CK
ENERO	<b>27.83</b>	28.76	30.10	29.24
FEBRERO	20.04	18.99	19.09	<b>18.84</b>
MARZO	19.40	17.12	<b>16.24</b>	19.05
ABRIL	20.33	22.27	20.33	<b>19.97</b>
MAYO	23.97	28.19	<b>23.03</b>	23.15
JUNIO	40.34	41.80	<b>31.85</b>	32.90
JULIO	41.19	40.96	<b>31.32</b>	34.59
AGOSTO	40.21	37.26	<b>27.04</b>	27.37
SEPTIEMBRE	28.71	28.81	<b>26.75</b>	27.54
OCTUBRE	23.01	22.89	21.03	<b>20.70</b>
NOVIEMBRE	22.96	25.24	<b>23.15</b>	23.53
DICIEMBRE	22.19	23.49	21.08	<b>20.27</b>

Para los métodos geoestadísticos, como se puede ver en la Tabla 3.26., evaluando MS se evidencia que tanto KO y CK presentan valores próximos a cero, siendo KO el que menos error presenta. Al evaluar RMSS ambos métodos geoestadísticos dan valores iguales o muy próximos a uno. Para valores de ASE, KO presenta los valores más bajos



para los meses de marzo a septiembre, en tanto que CK lo hace para los meses enero, febrero, octubre, noviembre y diciembre.

**Tabla 3.26: Valores de MS, RMSS Y ASE**

MES	MS		RMSS		ASE	
	KO	CK	KO	CK	KO	CK
ENERO	<b>-0.01</b>	0.04	1.024	<b>1.000</b>	24.34	<b>22.72</b>
FEBRERO	<b>-0.01</b>	0.02	<b>1.000</b>	1.003	21.92	<b>21.06</b>
MARZO	-0.05	<b>-0.04</b>	1.020	<b>0.999</b>	<b>23.53</b>	25.98
ABRIL	-0.05	<b>-0.02</b>	<b>1.000</b>	<b>1.000</b>	<b>36.50</b>	36.56
MAYO	<b>-0.02</b>	-0.08	<b>1.002</b>	1.005	<b>37.92</b>	43.42
JUNIO	<b>0.00</b>	-0.03	<b>1.000</b>	1.016	<b>58.35</b>	62.75
JULIO	<b>-0.01</b>	-0.06	<b>1.000</b>	<b>1.000</b>	<b>59.64</b>	66.70
AGOSTO	<b>0.00</b>	-0.08	<b>1.000</b>	1.001	<b>31.21</b>	36.21
SEPTIEMBRE	<b>-0.07</b>	-0.11	<b>1.000</b>	<b>1.000</b>	<b>25.13</b>	30.11
OCTUBRE	<b>0.00</b>	0.03	<b>1.000</b>	<b>1.000</b>	26.37	<b>25.16</b>
NOVIEMBRE	<b>-0.04</b>	<b>0.04</b>	<b>1.000</b>	<b>1.000</b>	22.99	<b>21.11</b>
DICIEMBRE	<b>0.02</b>	0.08	<b>1.000</b>	<b>1.000</b>	19.75	<b>17.73</b>

Para la precipitación media anual, el método geoestadísticokriging presenta los mejores valores para todos los estadígrafos calculados, ver Tabla 3.27.

**Tabla 3.27: Valores de ME, RMS, MAE, MS, RMSS Y ASE para precipitación anual**

METODO	ME	RMS	MAE (%)	MS	RMSS	ASE
TH	-1.23	294.35	21.75			
IDW	-42.58	316.29	23.60			
KO	<b>-0.37</b>	<b>315.73</b>	<b>21.31</b>	<b>-0.002</b>	<b>1.000</b>	<b>335.70</b>
CK	-10.73	327.53	21.49	-0.034	<b>1.000</b>	351.00

Como un elemento adicional a la validación cruzada, los mapas generados por los diferentes métodos son evaluados visualmente con la idea de verificar la existencia de uniformidad espacial de la distribución de



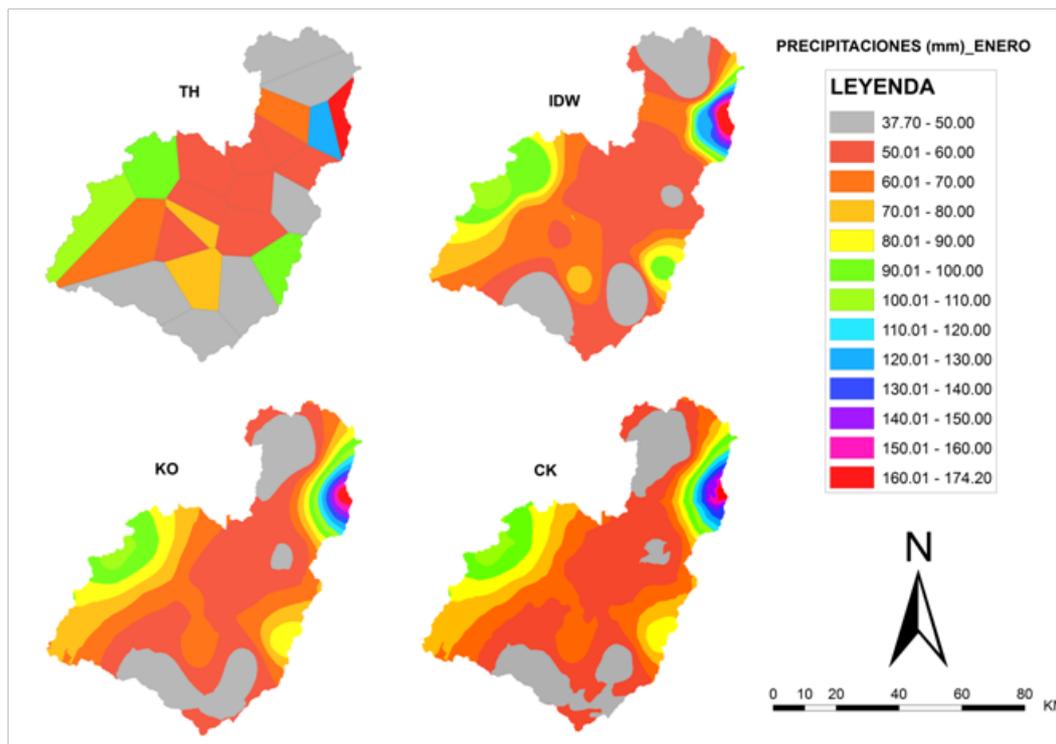
la precipitación. Los mapas se muestran en las Figuras 3.6 a 3.18. Los mapas de precipitación generados por TH muestran zonas poligonales alrededor de cada estación de medición con un valor constante de precipitación, presentando un campo de lluvia discontinuo y poco realista en la frontera de cada polígono, ocultando la verdadera variación espacial de la precipitación. Si bien hay que reconocer como una ventaja de este método a su simplicidad, sin embargo, las desventajas son obvias, pues la estimación se basa sólo en una medida ignorando la información de los puntos de la vecindad.

Los mapas generados por IDW, muestran una distribución de áreas con límites similares a los mapas de TH. Dentro de estas áreas se presentan los denominados ojos de buey que corresponde a valores de lluvia altos o bajos y que no representan una continuidad espacial de la precipitación en el área de interpolación; estos ojos de buey dan la apariencia de islas con información puntual que puede visualizarse como áreas cerradas no integradas a la continuidad del mapa generado, lo cual es una desventaja del método, sin embargo hay que reconocer que IDW tiene sus ventajas en la generación de mapas de precipitación con continuidad espacial integrando la información de los datos vecinos, y ya no de un solo punto como TH, con una sencillez en su aplicación por la configuración de su formulación matemática.

Los mapas generados por KO y CK muestran patrones o formas relativamente similares a los obtenidos con IDW, sin embargo los mapas de KO y CK son parejos, sin los ojos de buey presentes en IDW.

Los mapas obtenidos por CK incluyen a variables auxiliares de interpolación, por lo que los modelos espaciales de la precipitación son influenciados por estas variables secundarias, lo cual se refleja en una mayor uniformidad de la representación del modelo en áreas dónde hay pocas medidas de lluvia, como la porción suroeste del área de estudio.

La diferencia visual notoria entre los métodos de interpolación se refleja en los mapas de lluvia interpolada para los meses de mayo, junio, julio, agosto y septiembre, periodo en el cual CK, a diferencia de los otros métodos, presenta mapas que si bien mantienen áreas con patrones de precipitación similares a los demás métodos, la distribución espacial de la precipitación en el interior de estas áreas no presenta una superficie suavizada o contorneada sino una superficie con filos dando una apariencia rugosa, evidenciándose que la influencia en la interpolación de la variable secundaria derivada de la topografía utilizada como auxiliar es alta en estos meses; este período corresponde a la estación invernal de las zonas con régimen de lluvia unimodal.



**Figura 3.6: Mapas de interpolación de precipitación para el mes de enero. (TH: Thiessen; IDW: inverso del peso de la distancia; KO: kriging; CK: cokriging)**

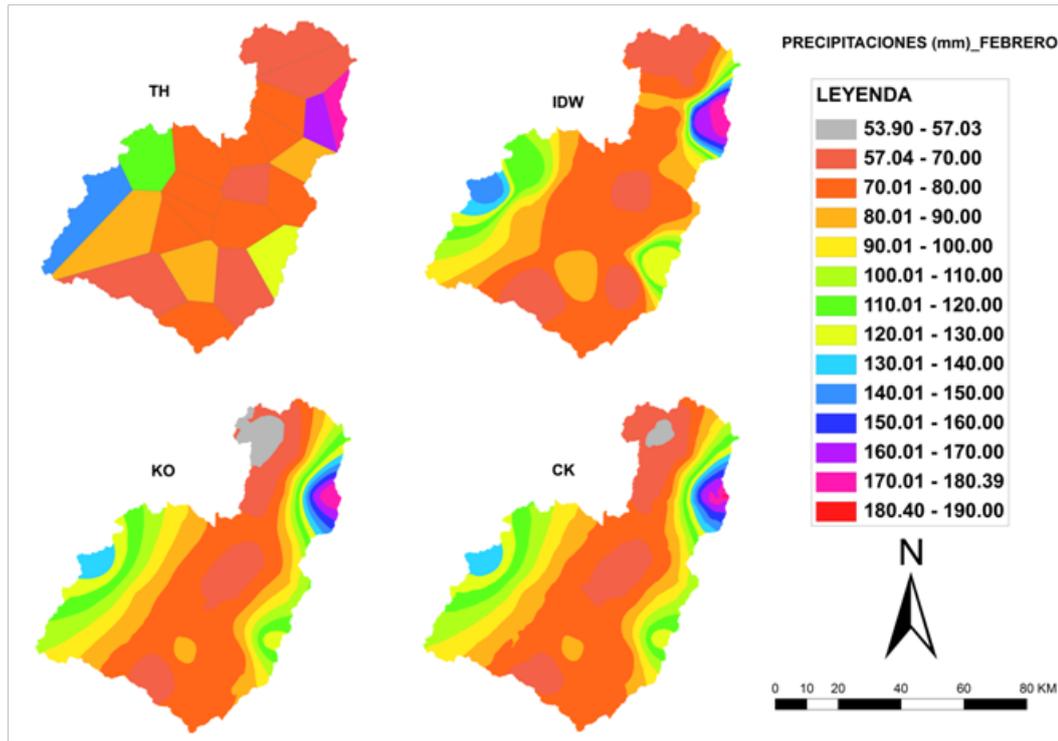


Figura 3.7: Igual que Figura 3.6 pero para febrero

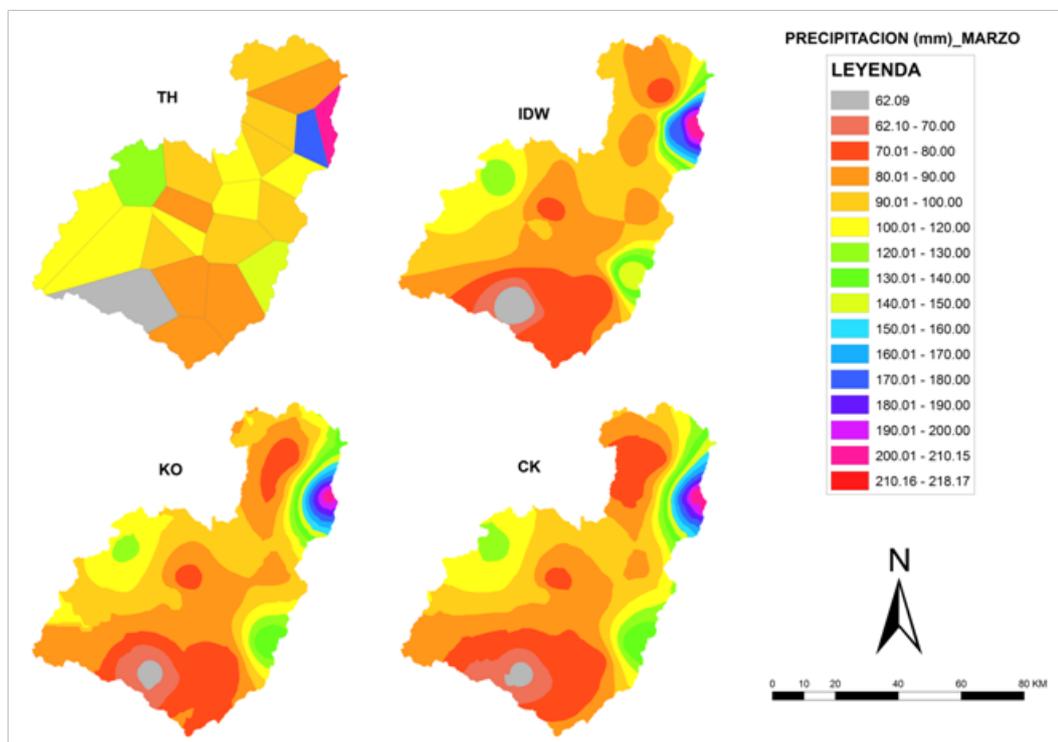


Figura 3.8: Igual que Figura 3.6 pero para marzo

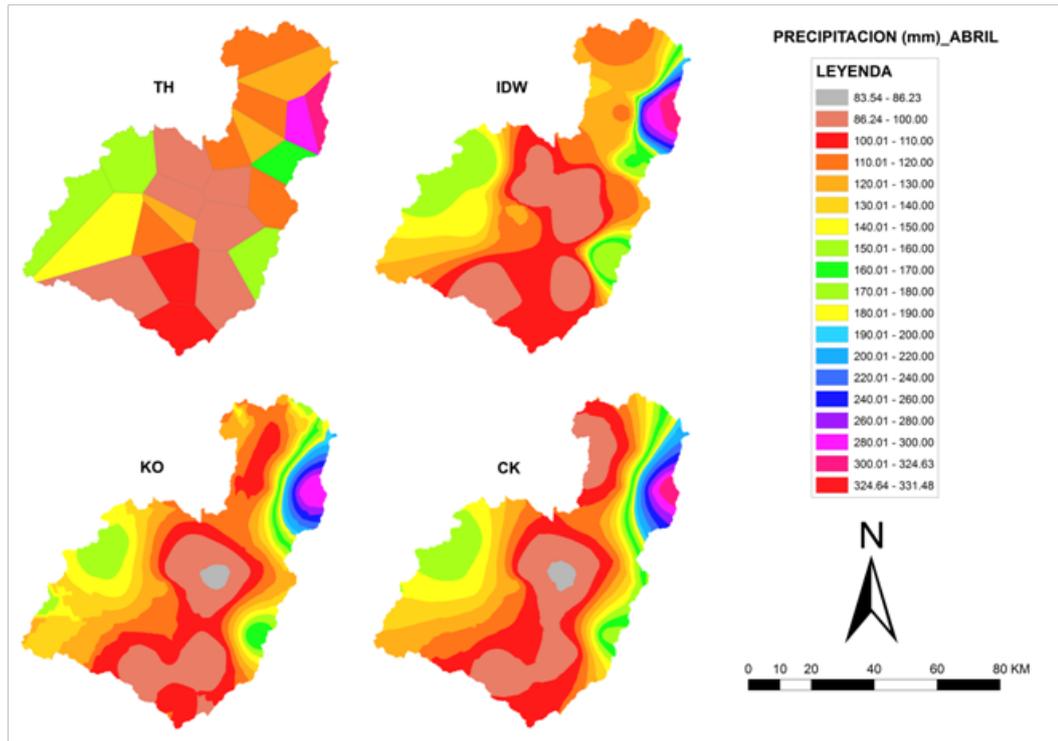


Figura 3.9: Igual que Figura 3.6 pero para abril

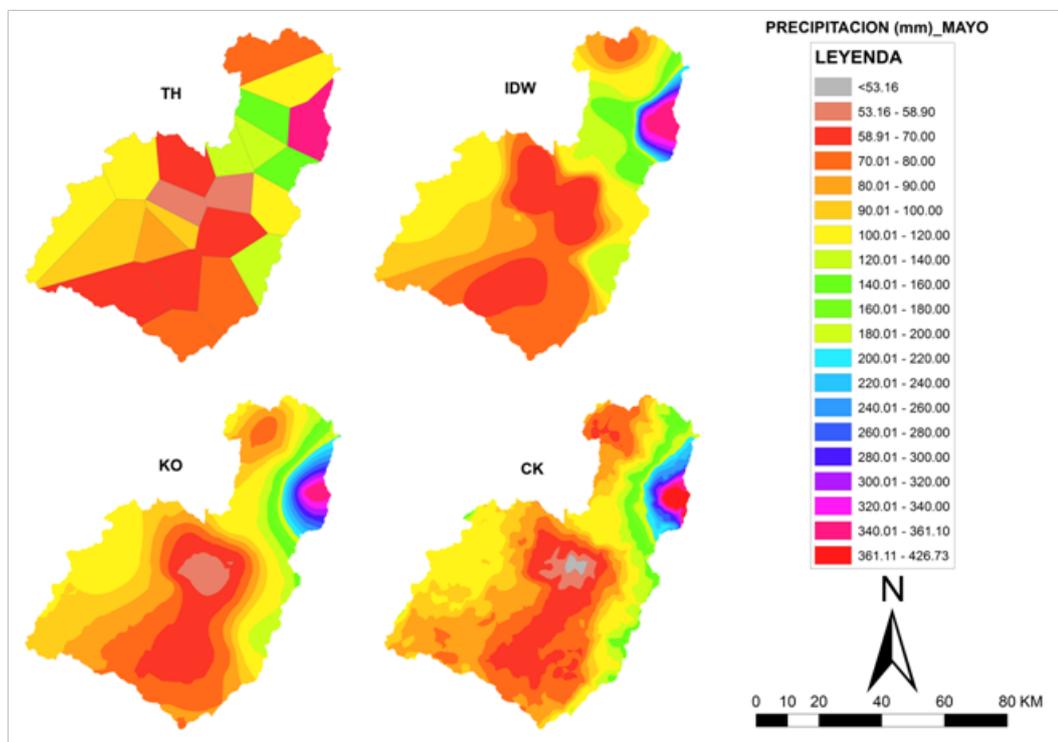


Figura 3.10: Igual que Figura 3.6 pero para mayo

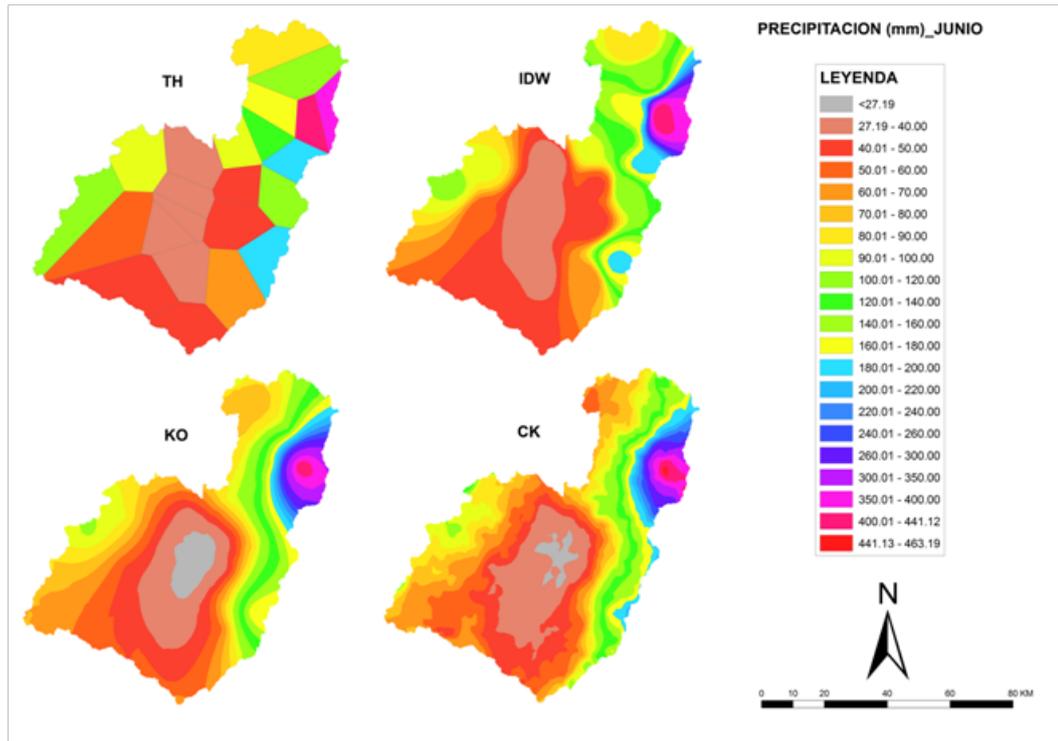


Figura 3.11: Igual que Figura 3.6 pero para junio

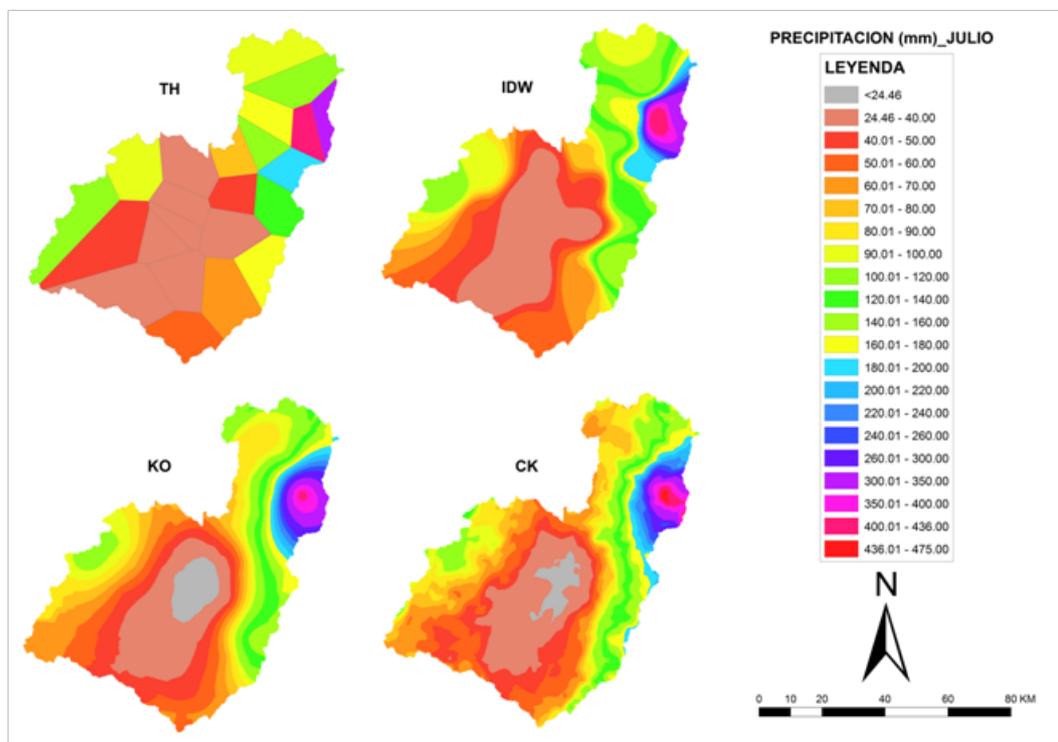


Figura 3.12: Igual que Figura 3.6 pero para julio

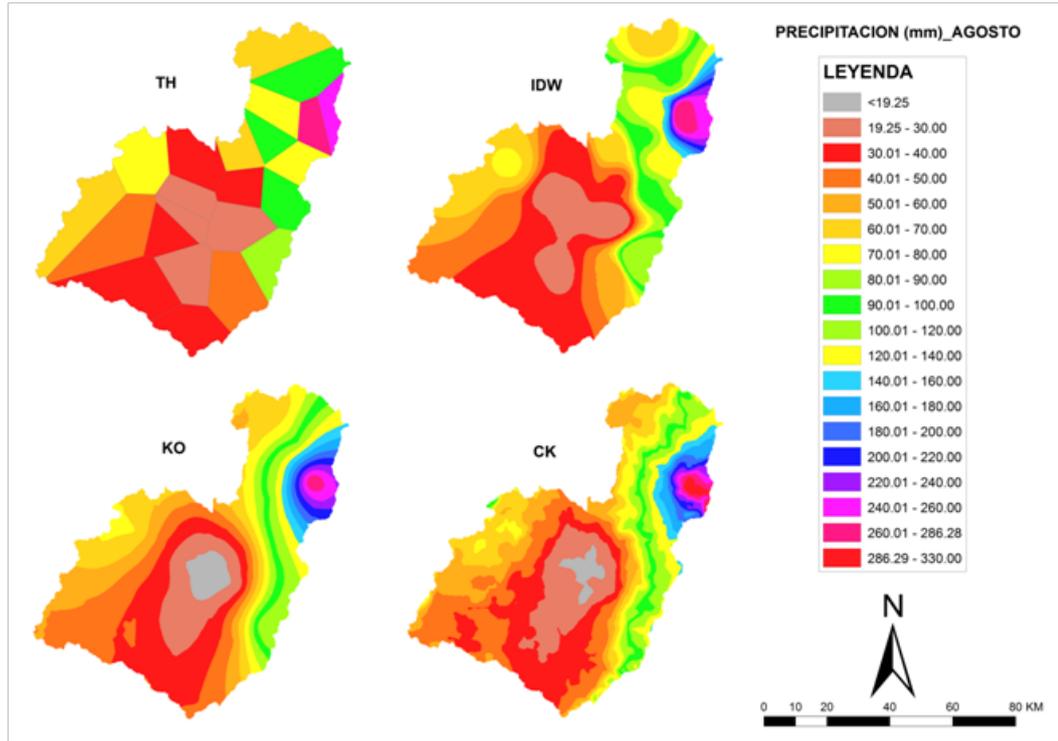


Figura 3.13: Igual que Figura 3.6 pero para agosto

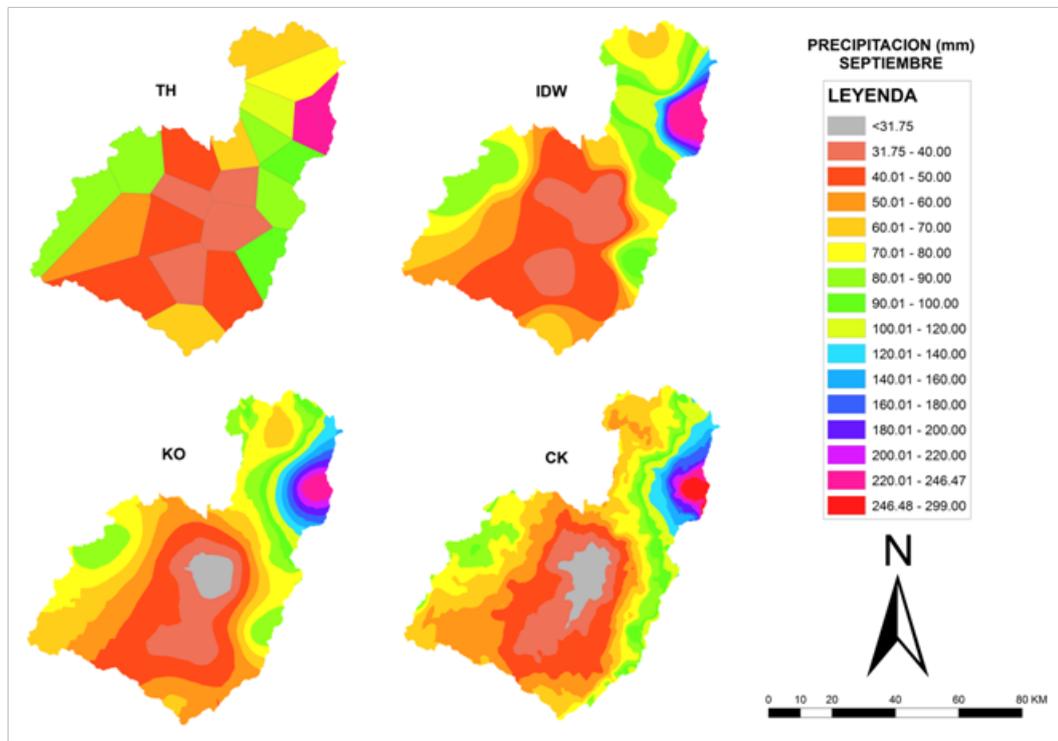


Figura 3.14: Igual que Figura 3.6 pero para septiembre

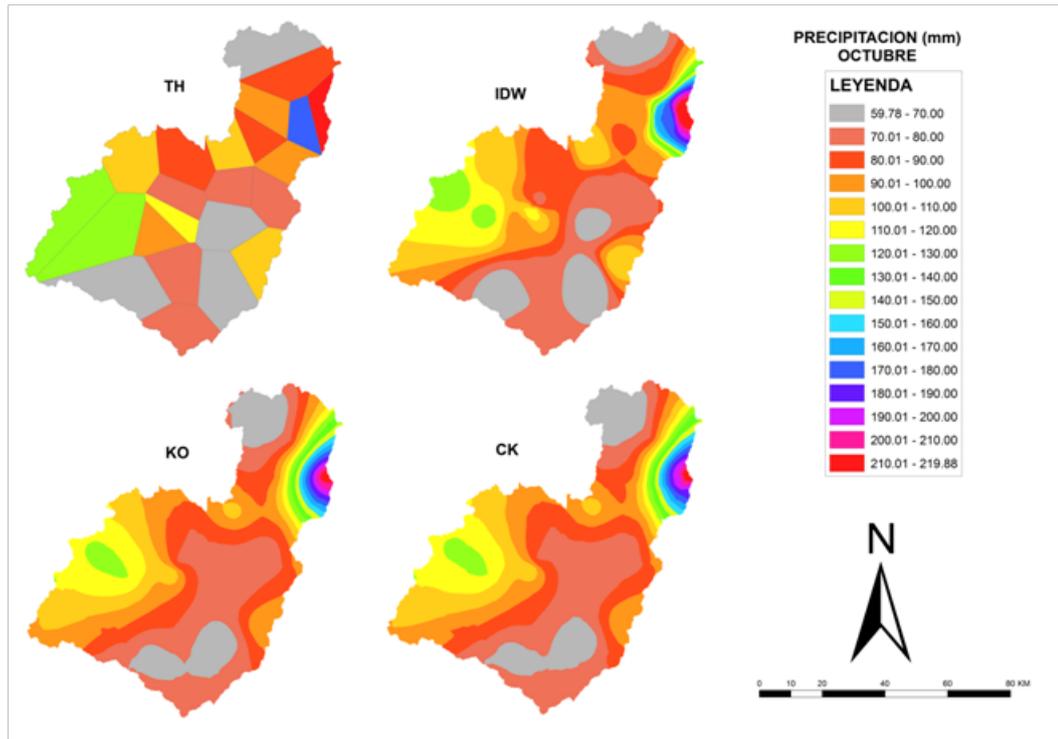


Figura 3.15: Igual que Figura 3.6 pero para octubre

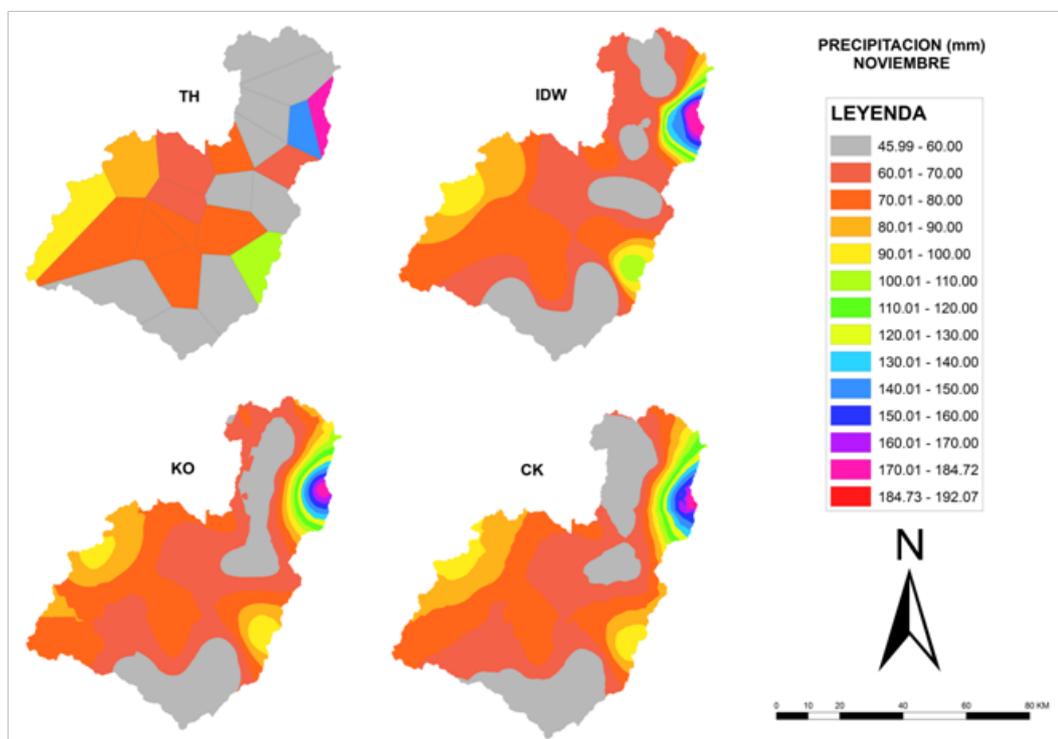


Figura 3.16: Igual que Figura 3.6 pero para noviembre

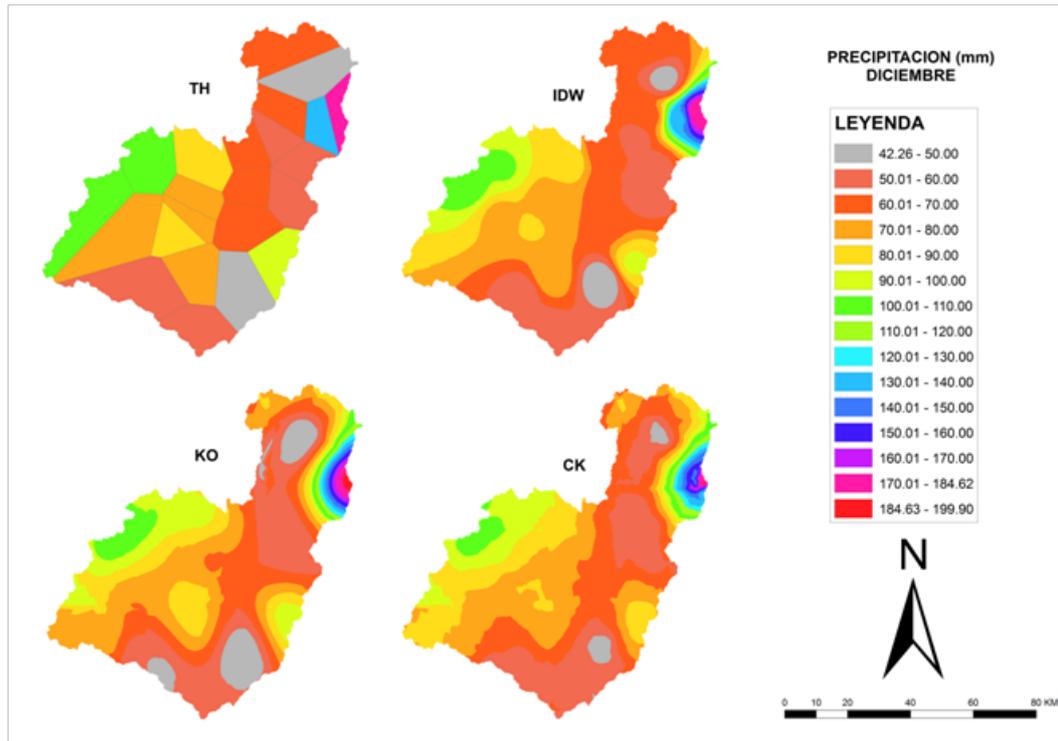


Figura 3.17: Igual que Figura 3.6 pero para diciembre

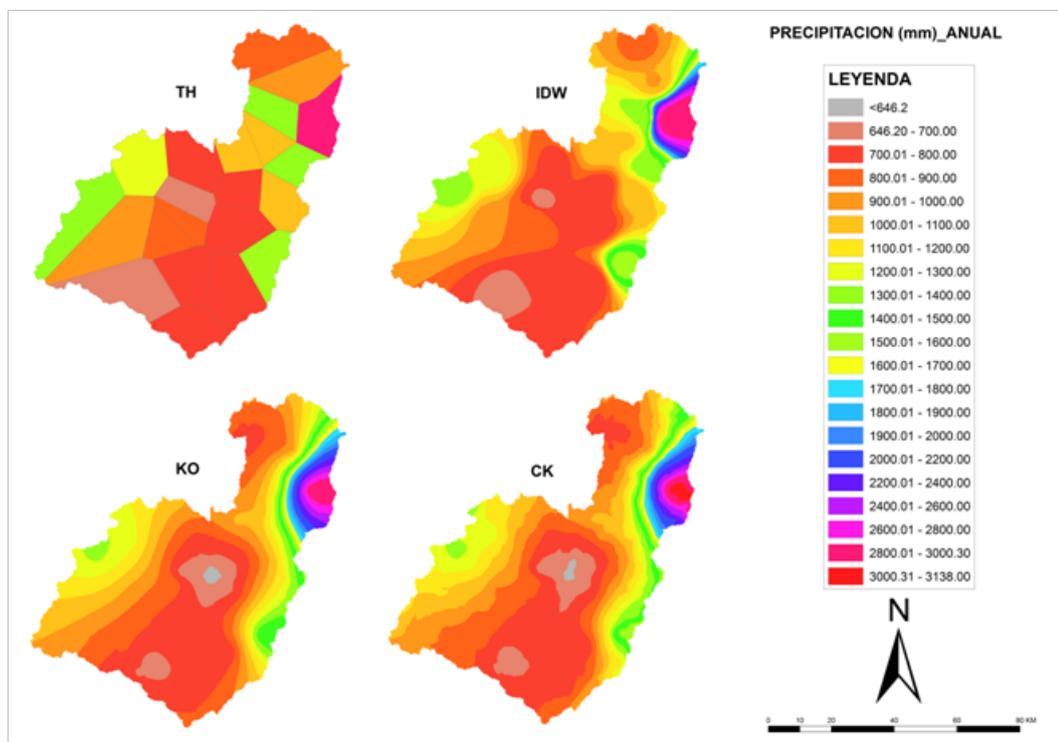
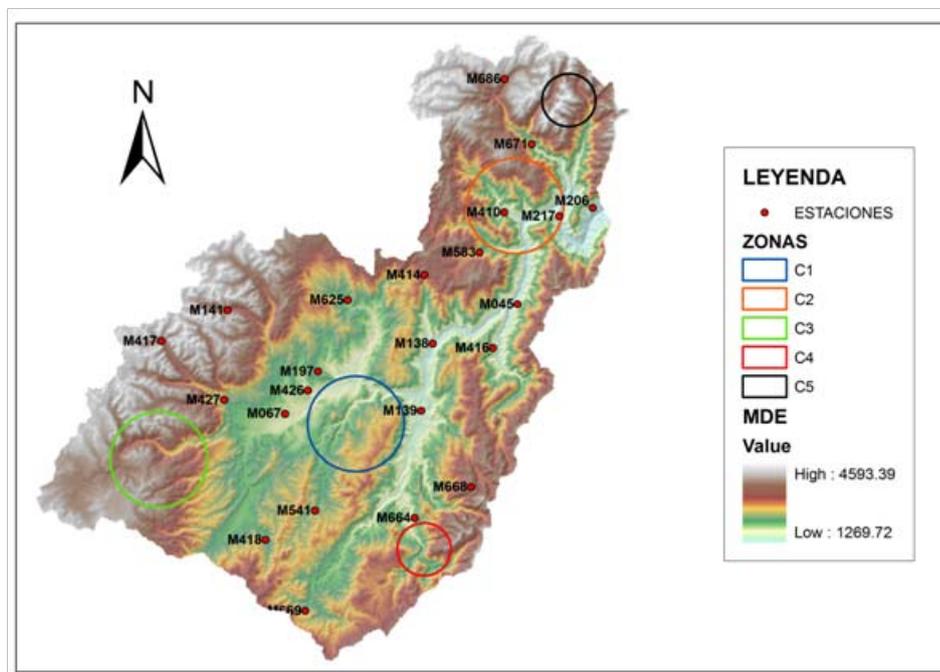


Figura 3.18: Igual que Figura 3.6 pero para precipitación media anual

Para analizar el comportamiento de los modelos de interpolación en zonas con características particulares dentro del área de estudio, se han trazado cinco círculos que en su orden delimitan zonas del callejón interandino y rodeada de estaciones de medición (C1), zona de la parte baja de la cuenca y con presencia de estaciones de medición (C2) y zonas en las cordilleras que no tienen estaciones de medición, en el suroeste (C3), sureste (C4) y noreste (C5). Ver Figura 3.19



**Figura 3.19: Trazo de círculos que definen zonas de análisis**

Para todas las zonas en análisis los valores estimados de precipitación media mensual y anual presentan similitudes entre TH e IDW y entre KO y CK, pero a su vez diferencias entre estos dos pares.

Para la zona C1 los valores de precipitación media mensual son similares para todos los métodos a excepción del período junio-agosto en donde se



aprecia que los métodos geoestadísticos presentan valores inferiores en un rango del 10 y 35% con respecto a TH e IDW. Ver Tabla 3.28

Para la zona C2 los valores obtenidos son similares para todos los métodos, con diferencias menores al 8%; los métodos geoestadísticos dan los menores valores interpolados. Ver Tabla 3.29

En las zonas C3, C4 y C5 que corresponden a áreas sin estaciones de medición, los métodos de interpolación trabajan como métodos de predicción espacial de la precipitación. Los valores de precipitación obtenidos para la zona C3 son similares para todos los métodos, presentando variaciones inferiores al 8%, con excepción de los meses junio y julio donde la variación alcanza el 14%. Ver Tabla 3.30

Para las zonas C4 y C5 los valores obtenidos por los métodos geoestadísticos en comparación con IDW y TH son bien diferenciados, presentando variaciones en el rango del 8 al 45% en C4 y del 8 al 64% en C5. Ver Tablas 3.31 y 3.32

En zonas con presencia de estaciones de medición como C1 y C2, tanto IDW como los métodos geoestadísticos a más de valores similares presentan mapas de precipitación con superficies suavizadas de distribución espacial; para las zonas de análisis en sitios sin presencia de estaciones de medición como C3, C4 y C5, los métodos geoestadísticos parecen ser los más razonables en función de los valores estimados y su distribución espacial.



**Tabla 3.28: Precipitación media en C1**

PRECIPITACION	TH	IDW	KO	CK
ENERO	62.06	60.48	58.65	58.76
FEBRERO	74.52	74.79	71.76	71.57
MARZO	96.40	96.39	94.17	92.65
ABRIL	104.02	105.18	100.08	97.69
MAYO	73.65	74.75	65.25	67.37
JUNIO	35.86	38.88	27.51	30.45
JULIO	32.28	35.70	23.23	26.60
AGOSTO	24.75	27.94	20.11	21.91
SEPTIEMBRE	37.64	39.45	34.84	32.88
OCTUBRE	85.84	86.42	80.14	80.40
NOVIEMBRE	72.27	70.29	70.40	69.19
DICIEMBRE	72.30	72.07	72.71	71.43
ANUAL	771.61	782.42	712.02	716.36

**Tabla 3.29: Precipitación media en C2**

PRECIPITACION	TH	IDW	KO	CK
ENERO	75.71	77.06	73.58	73.59
FEBRERO	98.23	99.15	96.15	96.18
MARZO	112.83	115.70	112.31	111.90
ABRIL	159.63	162.25	159.59	158.23
MAYO	186.90	188.12	182.07	179.26
JUNIO	223.70	223.26	215.12	211.78
JULIO	221.06	220.04	211.89	208.14
AGOSTO	163.61	162.93	157.28	155.27
SEPTIEMBRE	139.08	139.12	134.46	132.18
OCTUBRE	109.18	110.59	107.91	107.77
NOVIEMBRE	78.38	80.45	78.06	77.40
DICIEMBRE	79.69	81.38	74.78	78.95
ANUAL	1647.99	1657.24	1599.22	1590.65



**Tabla 3.30: Precipitación media en C3**

PRECIPITACION	TH	IDW	KO	CK
ENERO	66.09	69.06	65.29	65.64
FEBRERO	89.88	92.73	95.66	94.99
MARZO	104.41	100.55	98.96	94.16
ABRIL	140.43	133.19	130.45	129.23
MAYO	95.38	92.50	90.30	88.18
JUNIO	53.66	56.67	61.34	60.34
JULIO	52.21	56.38	57.78	56.79
AGOSTO	44.22	44.43	46.32	43.84
SEPTIEMBRE	58.54	58.77	61.31	58.13
OCTUBRE	115.66	106.87	102.89	103.00
NOVIEMBRE	70.70	73.31	72.46	71.93
DICIEMBRE	76.66	79.76	76.02	78.97
ANUAL	967.87	965.16	956.81	947.15

**Tabla 3.31: Precipitación media en C4**

PRECIPITACION	TH	IDW	KO	CK
ENERO	38.18	43.04	48.75	48.75
FEBRERO	65.24	69.03	79.62	78.44
MARZO	81.82	88.01	90.25	93.96
ABRIL	91.43	96.54	103.64	110.49
MAYO	73.63	76.93	84.01	92.90
JUNIO	61.37	67.23	80.32	89.19
JULIO	64.75	69.12	76.33	90.43
AGOSTO	49.99	52.90	60.54	66.78
SEPTIEMBRE	43.00	45.72	50.07	59.95
OCTUBRE	60.39	63.25	71.09	71.20
NOVIEMBRE	45.99	50.99	55.32	55.81
DICIEMBRE	42.26	47.04	43.24	51.80
ANUAL	718.10	763.51	879.16	901.33



**Tabla 3.32: Precipitación media en C5**

PRECIPITACION	TH	IDW	KO	CK
ENERO	41.13	53.98	66.77	67.28
FEBRERO	65.90	74.30	89.61	88.31
MARZO	88.58	104.10	108.45	116.01
ABRIL	118.12	133.15	145.14	162.38
MAYO	97.64	118.02	134.69	141.92
JUNIO	103.17	126.20	136.76	144.53
JULIO	102.37	124.91	125.11	137.74
AGOSTO	87.69	100.65	106.58	109.44
SEPTIEMBRE	73.22	87.76	94.46	102.45
OCTUBRE	74.09	83.45	100.38	101.42
NOVIEMBRE	55.99	67.89	75.59	85.53
DICIEMBRE	51.74	65.54	74.45	76.56
ANUAL	959.65	1126.92	1336.27	1343.75



## Capítulo 4

### Conclusiones

El objetivo de este estudio fue determinar el mejor método para estimar la precipitación espacial a partir de datos obtenidos en estaciones de medición y el apoyo de variables secundarias derivadas de la topografía como auxiliares de interpolación mediante el uso de tecnologías de información geográfica. Para cumplir con esto, se ha contestado a dos hipótesis centrales, (i) identificar los parámetros topográficos que tienen una estrecha correlación con los valores de precipitación mensual y anual, y(ii) identificar la técnica de interpolación que mejor estima la precipitación mensual y anual en zonas interandinas con aplicación en la cuenca del río Paute.

Se analizaron cuatro métodos de interpolación para obtener mapas de precipitación: Thiessen, IDW, kriging y cokriging. Se calcularon los modelos y se compararon cartográficamente y estadísticamente a través de la validación cruzada; para los estimadores de cokriging se añadió una única variable secundaria que corresponde a los denominados Índices Orográficos derivados en este estudio.

Se calcularon un total de 76 variables topográficas y/o geográficas, de las cuales 50 son obtenidas directamente a partir del modelo digital de elevaciones y posicionamiento geográfico y 26 variables son indirectas obtenidas a partir del producto escalar entre algunas de las primeras 50 variables, para su posterior análisis de correlación con la precipitación mensual y anual.

Las variables presentaron valores muy pobres de correlación ( $r < 0.3$ ) o a lo sumo una correlación moderada ( $r < 0.6$ ) sólo para 1-3 meses al año, y por lo tanto no pueden ser utilizadas en forma general. Por ejemplo, la altura presenta correlaciones con  $r < 0.28$ . Solamente para las variables Rango y Pendiente los coeficientes de correlación están en el intervalo de



0.41 a 0.87, presentando para 6 meses valores mayores a 0.70. Por estos motivos se buscaron otras variables denominadas índices orográficos que permitan explicar de mejor manera la variabilidad de la precipitación.

El Índice Orográfico 1 ( $IO_1$ ), definido en este estudio como el producto escalar de la Pendiente por el Rango derivados del círculo de influencia de radio 5 kilómetros, dividido para la barrera topográfica definida como la altura media del trapecio circular (radios 15 y 10 km) en la dirección Este, presenta muy buena correlación con la precipitación anual y de los meses que van de mayo a septiembre (coeficiente de Pearson mayor a 0.91). Por otro lado, el Índice Orográfico 2 ( $IO_2$ ), definido como el producto escalar del Rango encontrado en un círculo de influencia de radio 5 kilómetros y la diferencia entre la Altura Media (derivada del círculo de influencia de radio 5 kilómetros) con la altura de la Cordillera Oriental (definida como la altura media de la línea que une los picos de la cordillera Oriental en una longitud de 5 kilómetros y en dirección Este del punto al cual se le relaciona), da correlaciones aceptables ( $r > 0.56$ ) para los meses no explicados por el  $IO_1$ .

En síntesis, el  $IO_1$  presenta una buena correlación con la precipitación en el periodo invernal de las estaciones de régimen Unimodal, en tanto que el  $IO_2$  lo hace para los periodos invernales de las estaciones de regímenes Bimodal.

Los modelos teóricos de los semivariogramas que mejores estadígrafos presentaron en la validación de su modelación corresponden a los del tipo Esférico, con excepción del modelo Gausiano utilizado para el método kriging en el mes de diciembre. Todos los modelos tienen valores de “nugget” iguales a cero lo cual permite minimizar el error causado por los datos y modelo.

Los mejores modelos de IDW, en base a los estadígrafos de validación, fueron los obtenidos con grados de potencias de 3.5 y 4.0.



Se encontró que todos los cuatro métodos estimaron en forma muy similar la precipitación mensual y anual media sobre el área de estudio. Por esto, si se tratara únicamente de saber el valor medio de la precipitación sería recomendable utilizar Thiessen por su sencillez y facilidad de aplicación llegando a resultados satisfactorios sin necesidad de modelamientos matemáticos complejos.

Para valores mínimos y máximos de precipitación sobre el área de estudio, TH e IDW presentan valores iguales a los datos extremos de las estaciones de medición utilizadas; en comparación con estos datos los métodos OK y CK subestiman los valores mínimos y sobrestiman los valores máximos, en especial CK.

Al comparar los métodos de interpolación mediante la validación cruzada se encontró que el mejor método para los meses enero, febrero, abril, octubre, noviembre y diciembre es cokriging, en tanto que para los meses marzo, mayo, junio, julio, agosto y septiembre y para la media anual es el método de kriging. Estos métodos obtuvieron los mejores estadígrafos utilizados para la comparación.

Todos los métodos dan resultados similares en zonas con presencia de estaciones de medición. En zonas sin presencia de estaciones de medición, donde los métodos ya no funcionarían como interpoladores sino más bien como predictores, los valores obtenidos con TH tienen apreciables diferencias con los valores obtenidos por IDW, KO y CK (ver Tablas 3.30, 3.31 y 3.32 y Figura 3.18). En estos casos, a partir de los estadígrafos obtenidos de la validación cruzada, un análisis visual de los mapas generados por cada método y de consultas con expertos hidrólogos, los métodos geoestadísticos son los que mejor comportamiento tendrían y los que serían sugeridos para su utilización.



Las tecnologías de información geográfica, como los SIG y la geoestadística son herramientas robustas que permiten apoyar de manera extraordinaria a los expertos hidrólogos en la obtención de mapas continuos de precipitación a partir de datos puntuales como son los registros de las estaciones de medición y la ayuda de variables orográficas altamente correlacionadas con la precipitación. No obstante el uso y aplicación de estas herramientas tiene que estar íntimamente ligado al conocimiento del comportamiento de la precipitación en el área de estudio, lo cual es únicamente atribuible a una alta experticia de un hidrólogo. De lo realizado en este estudio, por ejemplo, la obtención de los Índices Orográficos  $IO_1$  e  $IO_2$  es el resultado de un vasto conocimiento del comportamiento de la precipitación y características de la cuenca en estudio más la ayuda de las tecnologías de información geográfica.

En conclusión:

- Los métodos geoestadísticos KO y CK demandan mayor tiempo y complejidad en la modelación matemática y su solución, sin embargo sus resultados en la generación de superficies continuas de precipitación con menores errores que TH e IDW es una gran ventaja que se debe considerar al momento de su elección para interpolar datos de precipitación. En sitios sin información ubicados fuera de las estaciones de medición o en sitios con escasa presencia de estaciones, la aplicación del método cokriging con la ayuda de una variable secundaria altamente correlacionada con la precipitación como auxiliar de interpolación da mejores resultados que los demás métodos.
- Las superficies de precipitación generadas por los métodos geoestadísticos tienden a ser superficies suavizadas que desestiman por defecto o exceso los valores extremos de las



estaciones de medición. Si se trata de estimar la precipitación espacial en valores medios los métodos geoestadísticos serían los indicados, pero si se tratara de estimar superficies de precipitación de eventos extremos (mínimos o máximos), una estimación por defecto o exceso puede tener efectos graves sobre la posterior utilización de los resultados, por lo que en estos casos a pesar de que IDW pueda no ser el método con mejores estadígrafos en su validación, este dará mejores resultados por cuanto su estimación se encuentra dentro del rango de valores de las estaciones de medición utilizadas en la interpolación.

- Para escalas grandes, por ejemplo toda la cuenca de análisis, no haría falta usar métodos complejos como los geoestadísticos para obtener el valor de precipitación media mensual y anual en su área, en tanto que cuando el interés recae en entender la variabilidad interna dentro de la cuenca como por ejemplo estudios en escalas pequeñas (subcuenas o microcuenas) o para proyectos de riego, en donde la cantidad de precipitación es influenciada por los efectos locales y orográficos, si se requiere el uso de las técnicas geoestadísticas.
- Para estudios a pequeña escala, los ojos de buey generados en IDW son un gran problema por lo irreal de la distribución espacial, lo cual se puede mejorar decrementando el valor de la potencia, aunque esto implique aumentar el error del método; decremento que se lo tendría que realizar únicamente cuando se tenga un pleno conocimiento del comportamiento de la precipitación en esa zona para poder aceptar o rechazar los resultados obtenidos por el cambio, caso contrario se podrían dar por aceptados los resultados a pesar que puedan mostrar una completa distorsión del comportamiento de la precipitación.



Con todo lo analizado, se recomienda la continuación de este estudio mediante la realización de los siguientes estudios adicionales:

- Uso de formulación polinómica (regresión múltiple) con variables topográficas mejor correlacionadas con la precipitación como interpolador más una corrección con un mapa de residuales obtenido con kriging.
- Aplicar los métodos utilizados en este trabajo con datos de otro periodo de análisis y verificar si se mantiene los resultados obtenidos con respecto a la validación de los métodos de interpolación.
- Aplicar los métodos de interpolación pero discretizando el área de la cuenca en zonas en función, por ejemplo, de la altitud, subcuencas, para que sean agregadas y comparar los resultados los obtenidos en este estudio.



## Bibliografía

- Akhtari, R., Morid, S., & Hossai, M. (2009). Assessment of Areal Interpolation Methods for Spatial Analysis of SPI and EDI Drought Indices. *International Journal of Climatology* , 135-145.
- Alsamamra, H., Ruiz, J., Pozo, D., & Tovar, J. (2009). A comparative study of ordinary and residual kriging techniques for mapping global solar radiation over southern Spain. *Agricultural and Forest Meteorology* , 1343-1357.
- Bacchi, B., & Kottegoda, N. (1994). Identification and calibration of spatial correlation patterns of rainfall. *Journal of Hydrology* , 311-348.
- Basist, A., Bell, G., & Meentemeyer, V. (1994). Statistical relationships between topography and precipitation patterns. *Journal Climate* , 1305-1315.
- Bhowmik, A. K. (2012). A comparison of Bangladesh climate surfaces from the geostatistical point of view. *ISRN Meteorology* , 1-20.
- Bisquerra, R. (1989). *Introducción conceptual al análisis multivariable*. Barcelona, España: PPU.
- Briggs, P., & Cogley, G. (1996). Topographic bias in mesoscale precipitations networks. *Journal of Climate* , 205-218.
- Buytaert, W., Celleri, R., & Willems, P. (2006). Spatial and temporal rainfall variability in mountainous areas: A case study from the South Ecuadorian Andes. *Journal of Hydrology* , 1-9.
- Céleri, R. (2007). *Rainfall variability and rainfall-runoff dynamics in the Paute River Basin – Southern Ecuadorian Andes*. Heverlee, Belgica: Katholieke Universiteit Leuven.
- Chen, Y., Takara, K., Cluckie, I., & De Smedt, H. (2004). *GIS and remote sensing in hydrology, water resources and environment*. Wallingford: International Association of Hydrological Sciences.
- Chow, V. T. (1994). *Hidrología Aplicada*. Bogotá: McGraw - Hill.
- Coulibaly, M., & Becker, S. (2007). Spatial interpolation of annual precipitation in South Africa - Comparison and evaluation of methods. *Water International* , 494-502.



- Daly, C. (1994). A statistical-topographic model for mapping climatological precipitation over mountainous terrain. *Journal of Applied Meteorology* , 140-158.
- De Smedt, F. H., & Liu, Y. B. (2004). Application of GIS and remote sensing in flood modelling for complex terrain. *GIS and Remote Sensing in Hydrology, Water Resources and Environment* , 23-32.
- Diaz Viera, M. (2002). *Geoestadística Aplicada*. México: Instituto de Geofísica de la UNAM.
- Diodato, N. (2005). The influence of topographic co-variables on the spatial variability of precipitation over small regions of complex terrain. *International Journal of Climatology* , 351-363.
- Dobesch, H., Dumolard, P., & Dyras, I. (2007). *Spatial interpolation for climate data*. Londres: ISTE Ltd.
- Droque, G., Humbert, J., Deraisme, J., Mahr, N., & Freslon, N. (2002). A statistical-topographic model using an omnidirectional parameterization of the relief for mapping orographic rainfall. *International Journal of Climatology* , 599-613.
- Eischeid, J. (1995). The quality control of long-term climatological data using objective data analysis. *Journal of Applied Meteorology, Volumen 34* , 2787-2795.
- Fleming, M., Chapin, S., & Cramer, W. (2000). Geographic patterns and dynamics of Alaskan climate interpolated from a sparse station record. *Global Change Biology* , 49-58.
- Genton, M., & Furrer, R. (1998). Analysis of rainfall data by robust spatial statistics using S+SPATIALSTATS. *Journal of Geographic Information and Decision Analysis* , 116-126.
- Giraldo, R. (2005). *Introducción a la Geoestadística*. Bogotá: Departamento de Estadística, Universidad Nacional de Colombia.
- González, F. (2000). Quality control and homogeneity of precipitation data in the Southwest of Europe. *Journal of Climate* , 964-978.
- Guan, H., Wilson, J., & Makhnin, O. (2005). Geostatistical mapping of mountain precipitation incorporating auto-correlated effects of terrain and climatic characteristics. *Journal of Hydrometeorology* , 1018-1031.



- Guerra, F., Gómez, H., González, J., & Zambrano, Z. (2006). Uso actual de métodos y técnicas para el estudio de la precipitación incluyendo plataformas SIG. *Geoenseñanza* , 97-106.
- Hay, L., Viger, R., & McCabe, G. (1998). Precipitation interpolation in mountainous region usin multiple linear regression. *Hydrology, Water Resources and Ecology in Headwaters* , 33-38.
- Helsel, D., & Hirsch, R. (2002). CAPITULO 3: Statistical Methods in Water Resources. En U. G. SURVEY, *Hydrologic Analysis and Interpretation* (págs. 1-510). Reston: USGS.
- Hengl, T. (2005). Finding the right pixel size. *Computers & Geosciences* 32 , 1283–1298.
- Hevesi, J. (1992). Precipitation estimation in mountainous terrain using multivariate geostatistics. Part I. *Journal of Applied Meteorology* , 661-676.
- Houghton, J. (1979). A model for orographic precipitation in the North-Central Great Basin. *Monthly Weather Review* , 1462-1475.
- Hutchinson, M. (1989). A new method for gridding elevation and streamline data with automatic removal of pits. *Journal of Hydrology* , 211-232.
- Hutchinson, M. (1988). Calculation of hidrologically sound digital elevation models. *International Geographical Union* , 117-133.
- Jantakat, Y., & Ongsomwang, S. (2011). Assessing the effect of incorporating topographical data with geostatistical interpolation for monthly rainfall and temperature in Ping Basin, Thailand. *Suranaree Journal Science Technology* , 123-139.
- Jefferey, S., Carter, J., Moodie, K., & Beswick, A. (2001). Usin spatial interpolation to construct a comprehensive archive of Australian climate data. *Enviromental Modelling & Software* , 309-330.
- Konrad, C. (1995). Maximum precipitation rates in the southern Blue Ridge Mountains of the southeastern United States. *Climate Research* , 159-166.
- Konrad, C. (1996). Relationships between precipitation event types and topography in the Southern Blue Ridge Mountains of the Southeastern USA. *International Journal of Climatology* , 49-62.



- Kundzewicz, Z. W., & Robson, A. (2000). *Detecting trend and other changes in hydrological data*. Génova: World Climate Programme Data and Monitoring, WMO.
- Kyriakidis, P., Kim, J., & Miller, N. (2001). Geostatistical mapping of precipitation from rain gauge data using atmospheric and terrain characteristics. *Journal of Applied Meteorology* , 1855-1877.
- Lazaro, R., Rodrigo, F., Gutierrez, L., & Domingo, F. (2001). Analysis of a 30 year rainfall record (1967-1997) in semi-arid SE Spain for implications on vegetation. *Journal of Arid Enviroments* , 373-395.
- Ly, S., Charles, C., & Degré, A. (2011). Geostatistical interpolation of daily rainfall at catchment scale: the use of several variogram models in the Ourthe and Ambleve catchments, Belgium. *Hydrology and Earth System Sciences* , 2259–2274.
- Mair, A., & Fares, A. (2011). Comparison of rainfall interpolation methods in a mountainous region of a tropical island. *Journal of Hydrologic Engineering* , 371-383.
- Marquínez, J., Lastra, J., & García, P. (2003). Estimation models for precipitation in mountainous regions: the use of GIS and multivariate analysis. *Journal of Hydrology* , 1-11.
- Martínez, A. (1995). Estimation of mean annual precipitation as affected by elevation using multivariate geostatistics. *Water Resource Management* , 139-159.
- Monsalve, G. (1995). *Hidrología en la Ingeniería*. Bogotá: Tercer Mundo Editores.
- Murthy, K., & Abbaiah, G. (2007). Geostatistical analysis for estimation of mean rainfalls in Andhra Pradesh, India. *International Journal of Geology* , 35-51.
- Mutua, F. (2012). A comparison of spatial rainfall estimation techniques: A case study of Nyando river basin Kenya. *JAGST, Jomo Kenyatta University of Agriculture and Technology* , 95-112.
- Niekerk, A., & Joubert, S. (2011). Input variable selection for interpolating high-resolution climate surfaces for the Western Cape. *Water SA* , 271-279.



- Ninyerola, M., Pons, X., & Roure, J. (2000). A methodological approach of climatological modeling of air temperature and precipitation through GIS techniques. *International Journal of Climatology* , 1823-1841.
- PACC, (. D. (2009). *Modelación hidrológica y de recursos hídricos de la cuenca del Rio Paute*. Santiago: Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Pardo, E. (1998). Comparison of geostatistical methods for estimating the areal average climatological rainfall mean using data on precipitation and topography. *International Journal of Climatology* , 1031-1047.
- Parrilla Alcalá, E., & Ojeda Zújar, J. (2005). Análisis de regresión y la interpolación espacial en el estudio de episodios de precipitaciones diarias en la Cuenca del Retortillo. *Memorias del X Coloquio Ibérico de Geografía* .
- Perry, B., & Konrad, C. (2006). Relationships between NW flow snowfall and topography in the Southern Appalachians, USA. *Climate Research* , 35-47.
- Phillips, D., Dolph, J., & Marks, D. (1992). A comparison of geostatistical procedures for spatial analysis of precipitation in mountainous terrain. *Agricultural and Forest Meteorology* , 119-141.
- Portalés, C., Boronat, N., Pardo, J., & Balaguer, A. (2010). Seasonal precipitation interpolation at the Valencia region with multivariate methods using geographic and topographic information. *International Journal of Climatology* , 1547-1563.
- Ramírez, E., Mendoza, J., Salas, E., & Ribstein, P. (1995). Régimen espacial y temporal de las precipitaciones en la cuenca de la Paz. *Bull. Inst. fr. Etudes Andines* , 391-401.
- Ranhao, S., Baiping, Z., & Jing, T. (2008). A multivariate regression model for predicting precipitation in the Daqing Mountains. *Mountain Research and Development* , 318-325.
- Romero, R., & al, e. (2003). Role of Orography in the Spatial Distribution of Precipitation over the Spanish Mediterranean zone. *Climate Research* , 247-261.



- Sarangui, A., Cox, C., & Madramootoo, C. (2005). Geostatistical methods for prediction of spatial variability of rainfall in a mountainous region. *Transactions of the ASAE* , 943-954.
- Sevruk, B., Matokova, K., & Toskano, L. (1998). Topography effects on small-scale precipitation variability in the Swiss Pre-Alps. *Hydrology, Water Resources and Ecology in Headwaters* , 51-58.
- Shekhar, S., & Xiong, H. (2008). *Encyclopedia of GIS*. New York: Springer.
- Singh, P., & Kumar, N. (1997). Effect of orography on precipitation in the western Himalayan region. *Journal of Hydrogy* , 183-206.
- Suzuki, Y., Nakakita, E., Hasebe, M., & Ikebu, S. (2004). Study on rainfall-topography relationships in Japan with regard to the spatial scale of mountains slopes. *Sixth International Symposium on Hydrological Applications of Weather Radar*. Melbourne, Australia.
- Tabios, G., & Salas, J. (1985). A comparative analysis of techniques for spatial interpolation of precipitation. *Water Resources Bulletin* , 365-380.
- Tukey, J. (1977). *Exploratory Data Analysis*. Sidney, Australia: Addison-Wesley Publishing.
- Tveito, O., & Schöner, W. (2002). Application of spatial interpolation of climatological and meteorological elements by the use of geographical information systems (GIS). *Klima Report No. 28/02* .
- Webster, R., & Oliver, M. (2007). *Geostatistics for environmental scientist*. Chichester: WILEY.
- Wotling, G., & Bouvier, C. (2000). Regionalization of extreme precipitation distribution using de principal components of the topographical environment. *Journal Hydrology* , 86-101.
- Yang, Q., Ma, Z.-G., & Chen, L. (2011). A Preliminary Analysis of the Relationship between Precipitation Variation Trends and Altitude in China. *Atmospheric and Oceanics Science Letters* , 41-46.

## Anexo A

### Diagramas de caja de series de datos mensuales de precipitación

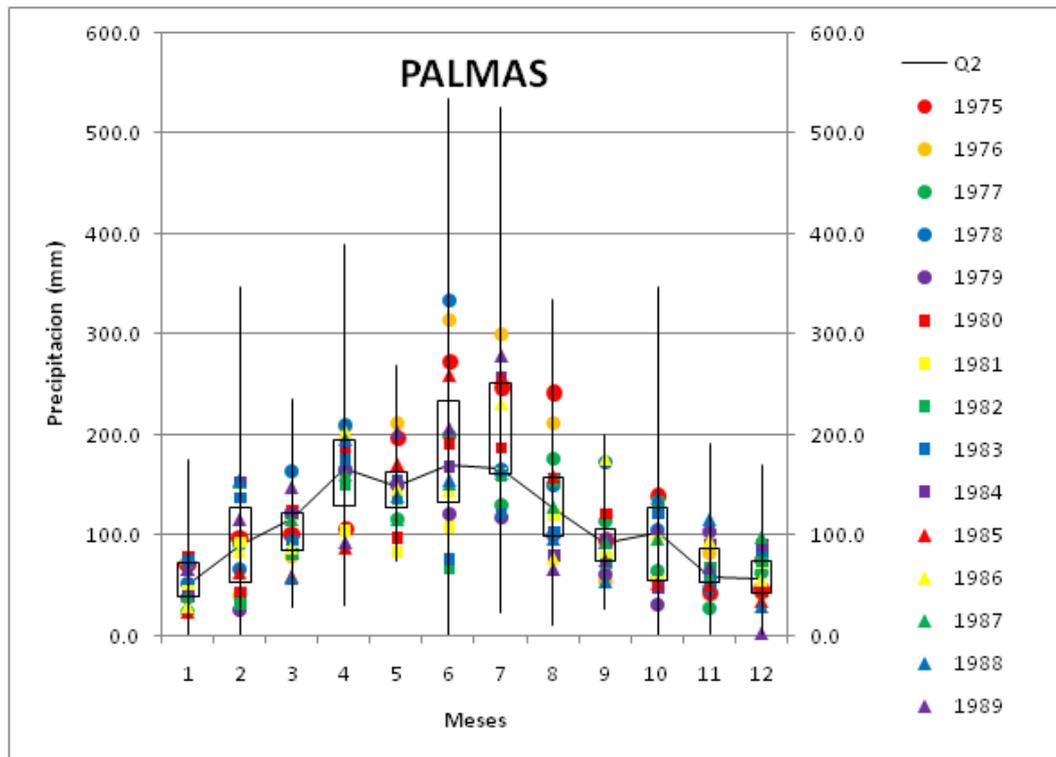


Figura A1: Diagrama de caja de la estación M045 Palmas, periodo 1975 – 1989. Q2 es la mediana.

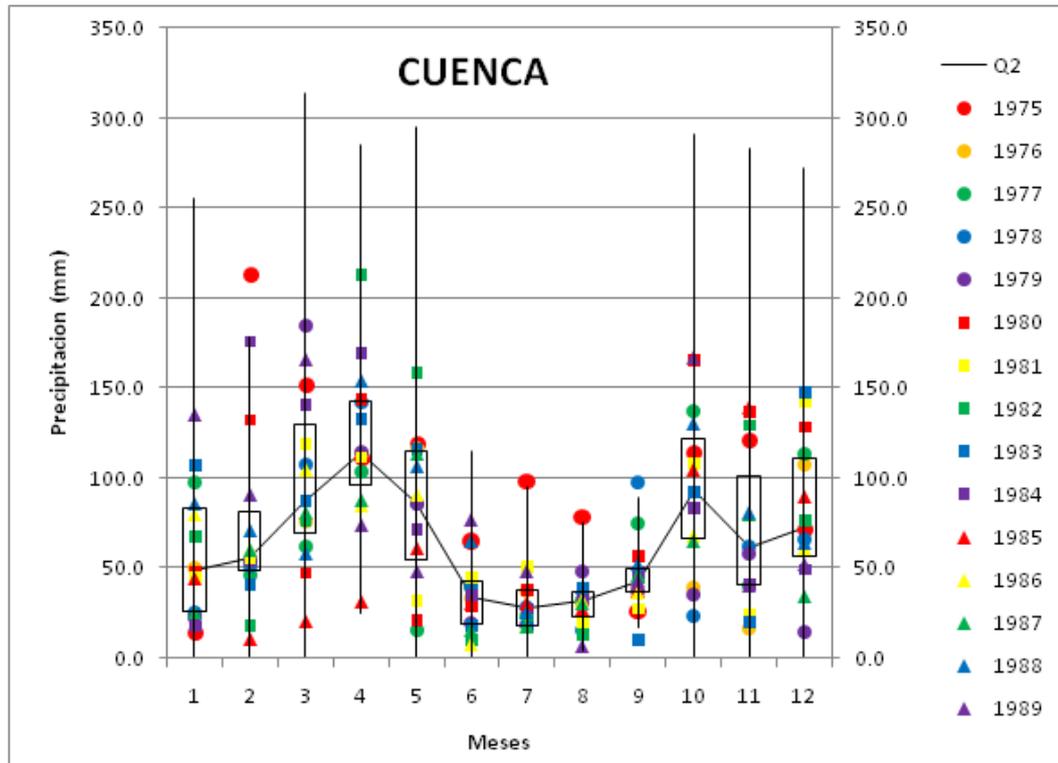


Figura A2: Diagrama de caja de la estación M067 Cuenca, periodo 1975 – 1989. Q2 es la mediana.

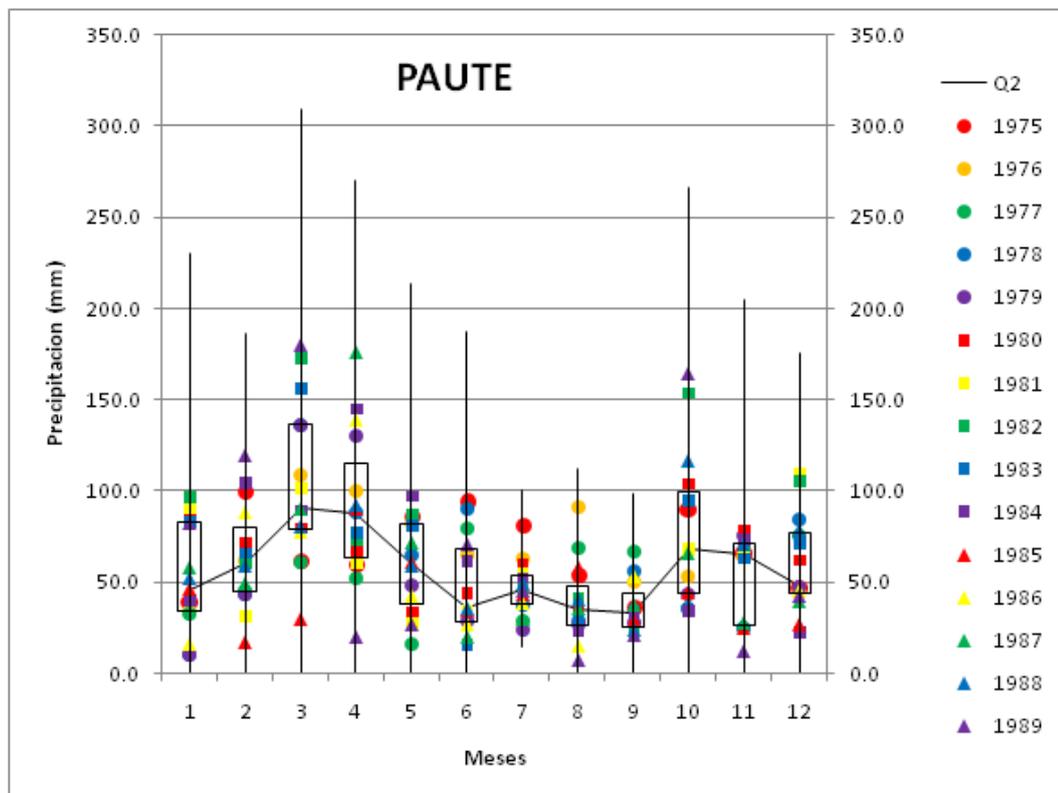


Figura A3: Diagrama de caja de la estación M138 Paute, periodo 1975 – 1989. Q2 es la mediana.

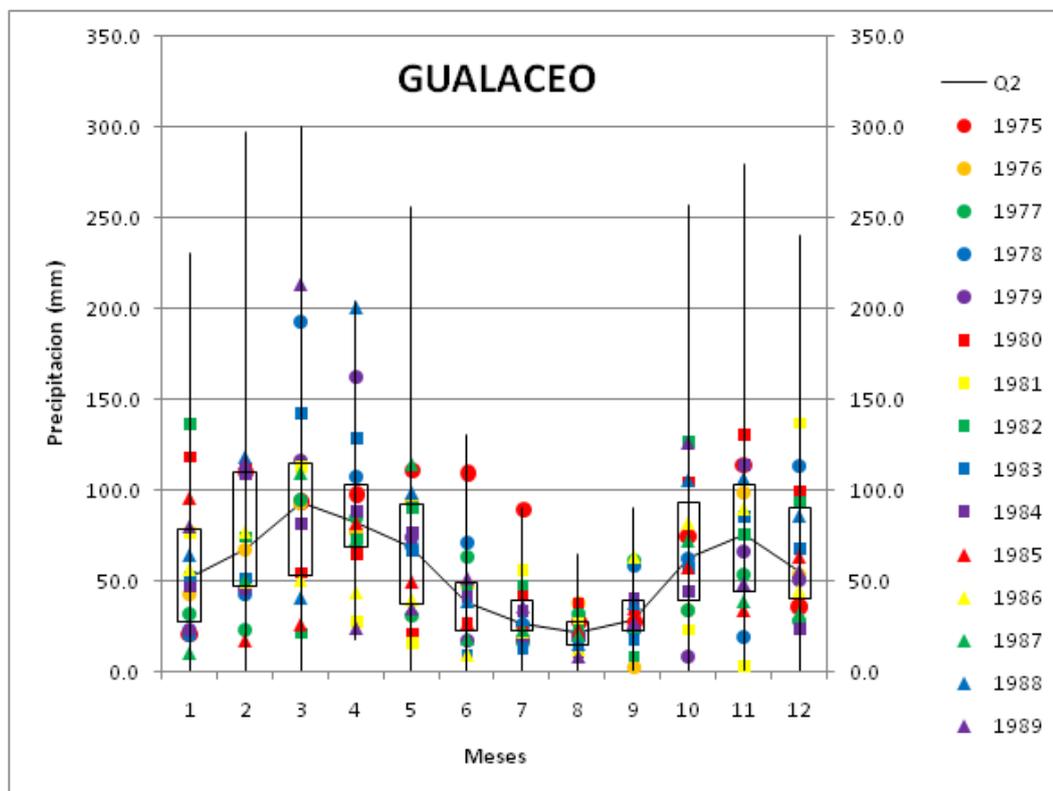


Figura A4: Diagrama de caja de la estación M139 Gualaceo, periodo 1975 – 1989. Q2 es la mediana.

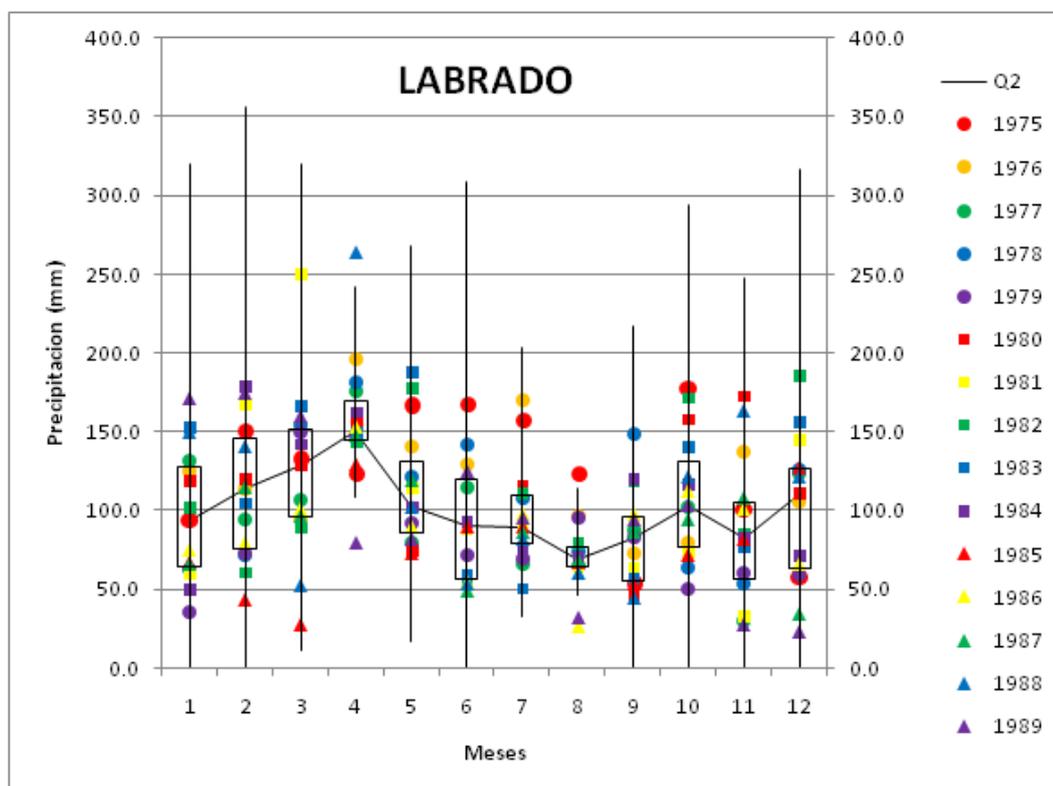


Figura A5: Diagrama de caja de la estación M141 El Labrado, periodo 1975 – 1989. Q2 es la mediana.

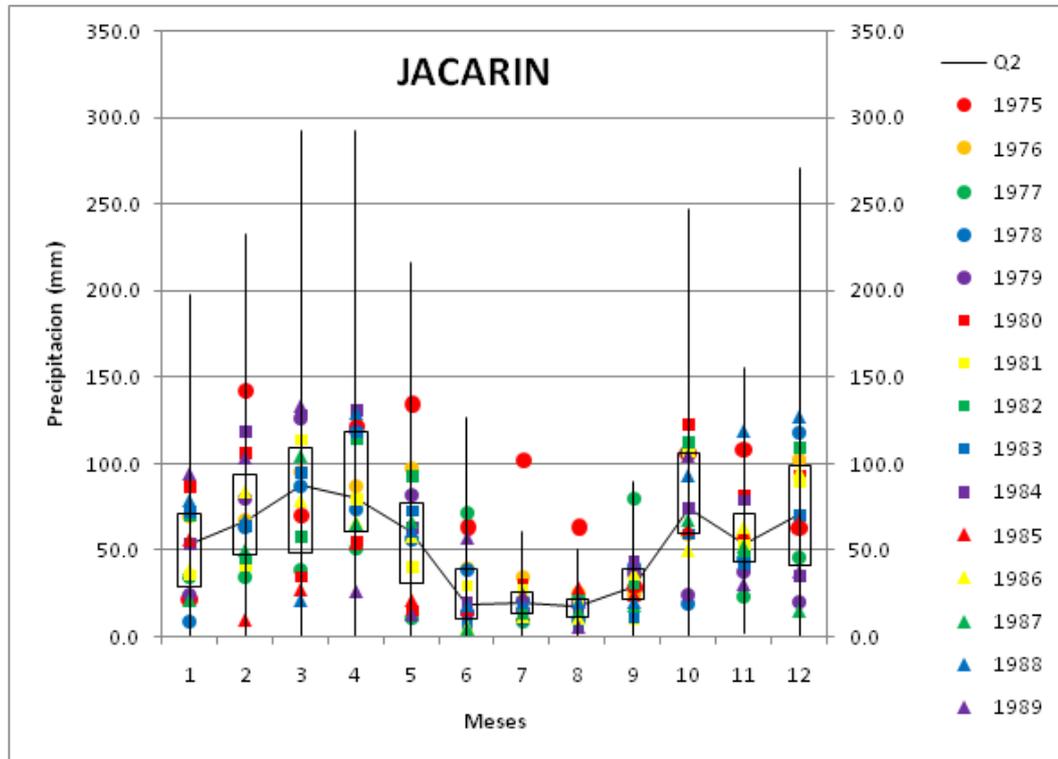


Figura A6: Diagrama de caja de la estación M197 Jacarín, periodo 1975 – 1989. Q2 es la mediana.

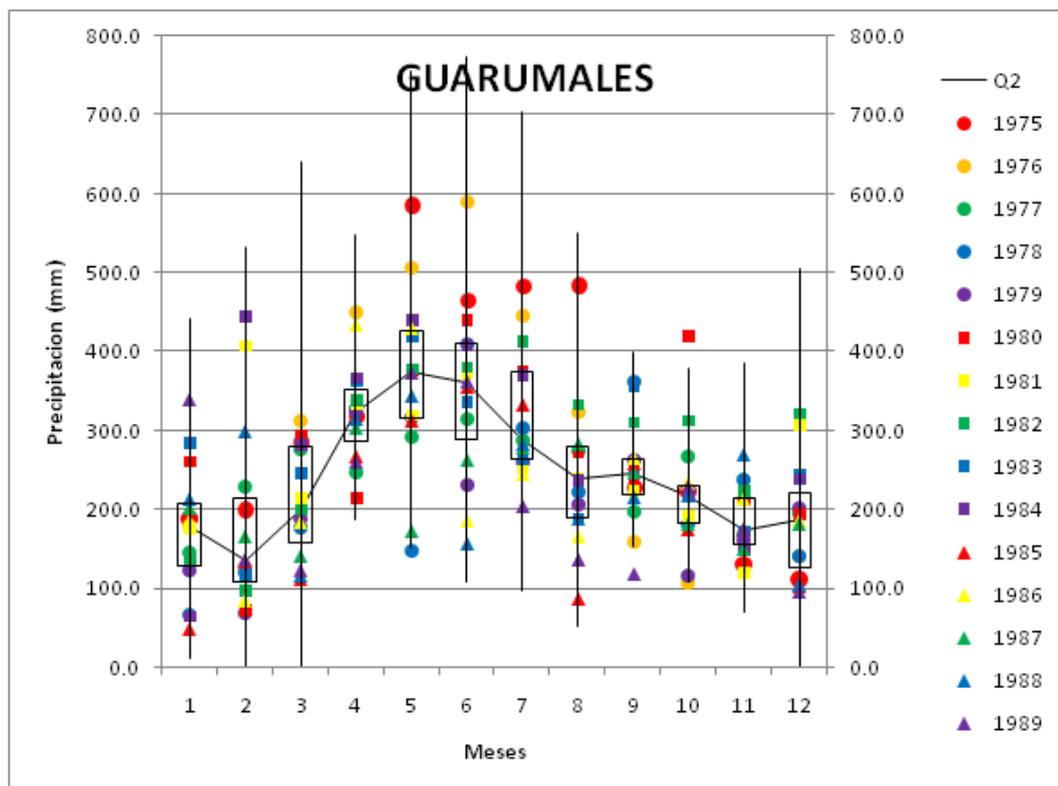


Figura A7: Diagrama de caja de la estación M206 Guarumales, periodo 1975 – 1989. Q2 es la mediana.

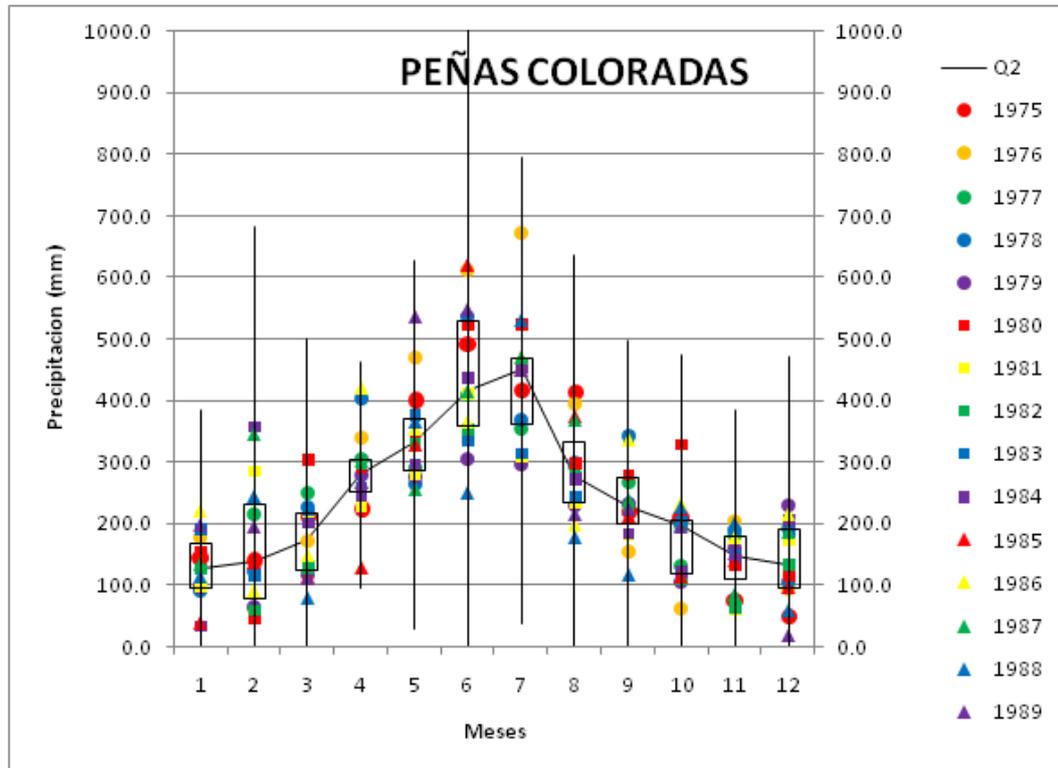


Figura A8: Diagrama de caja de la estación M217 Peñas Coloradas, periodo 1975 – 1989. Q2 es la mediana.

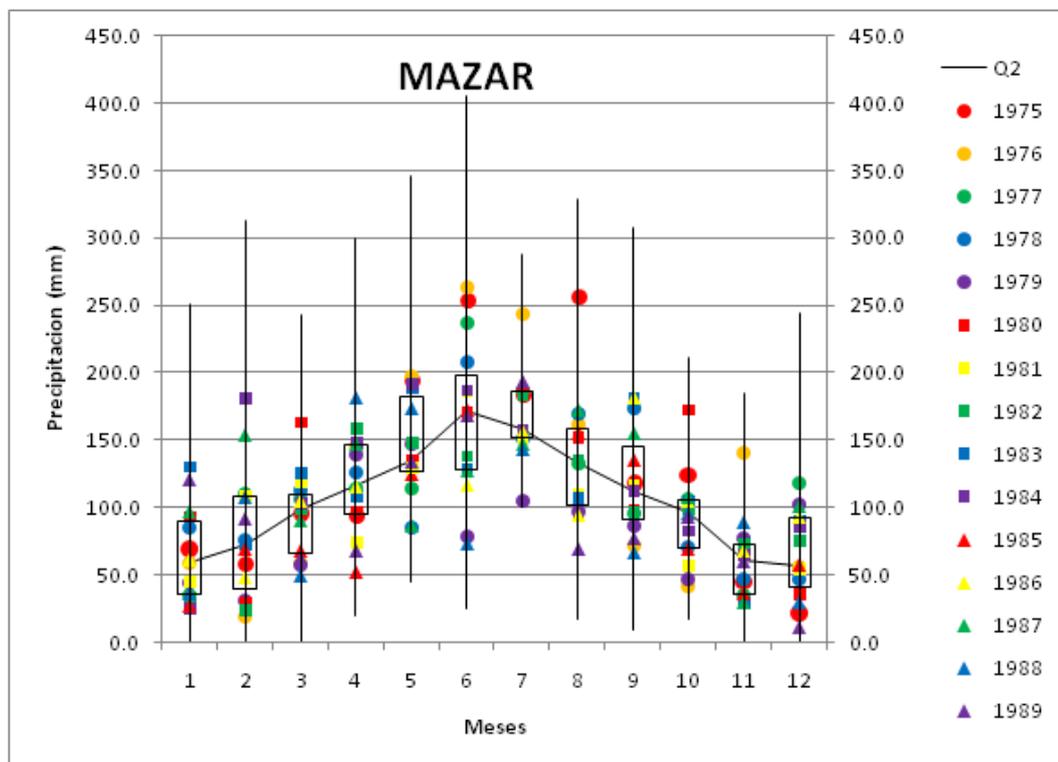


Figura A9: Diagrama de caja de la estación M410 Mazar Rivera, periodo 1975 – 1989. Q2 es la mediana.

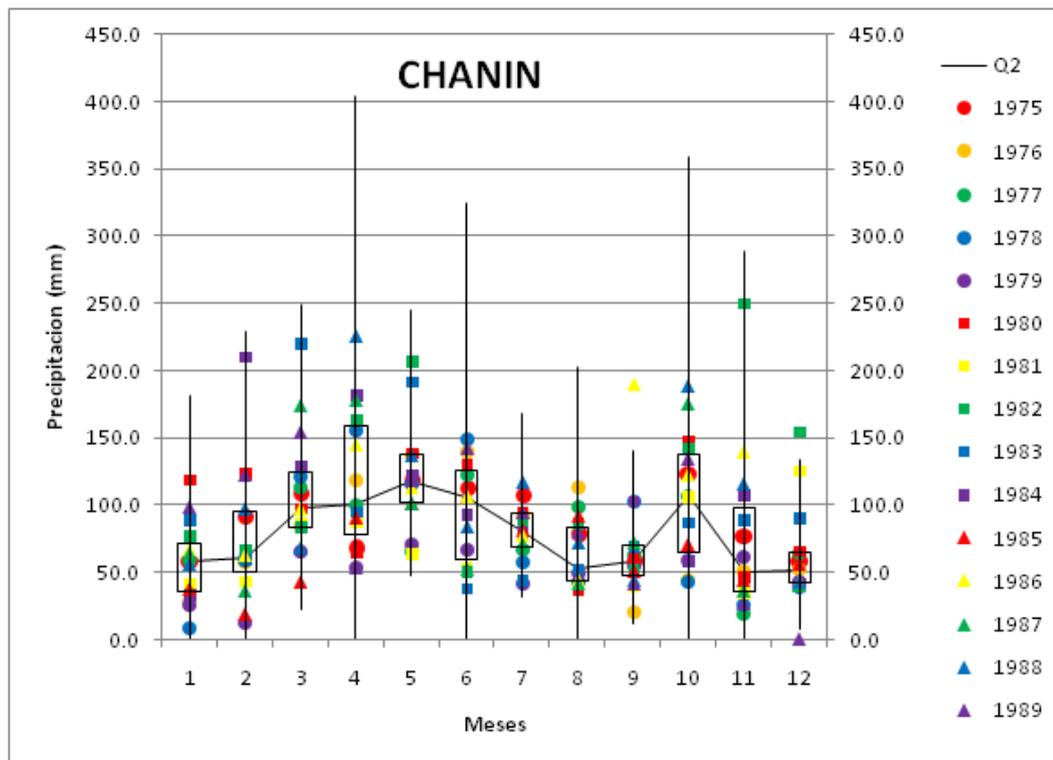


Figura A10: Diagrama de caja de la estación M414 Chanín, periodo 1975 – 1989. Q2 es la mediana.

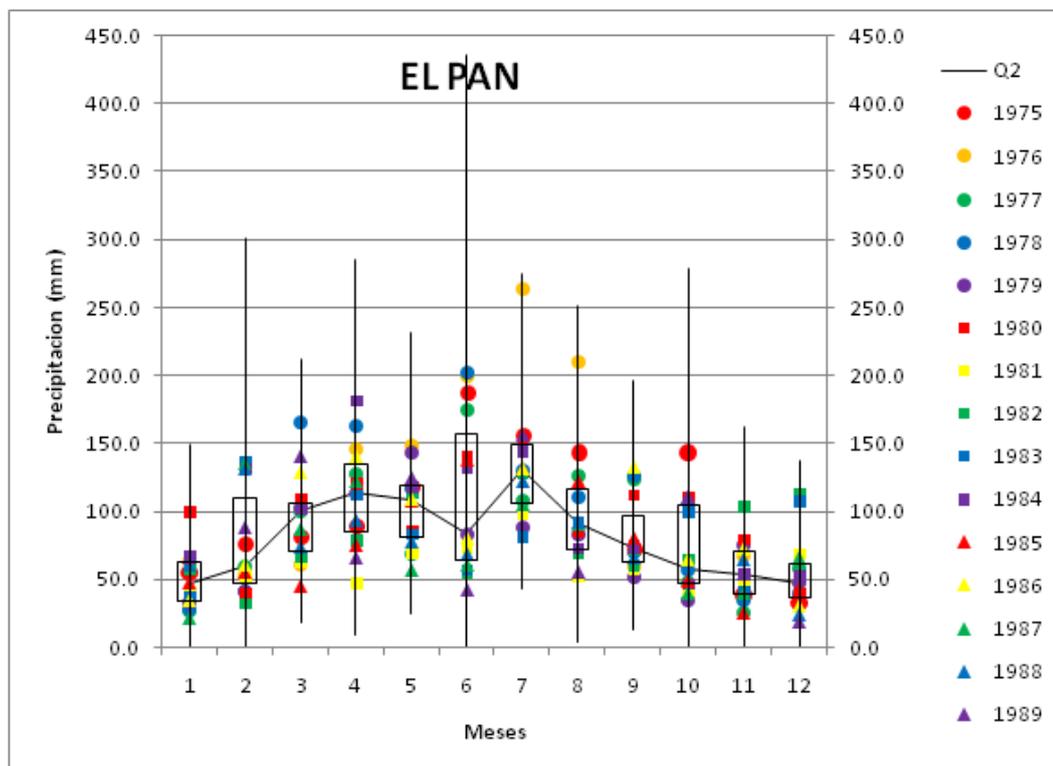


Figura A11: Diagrama de caja de la estación M416 El Pan, periodo 1975 – 1989. Q2 es la mediana.

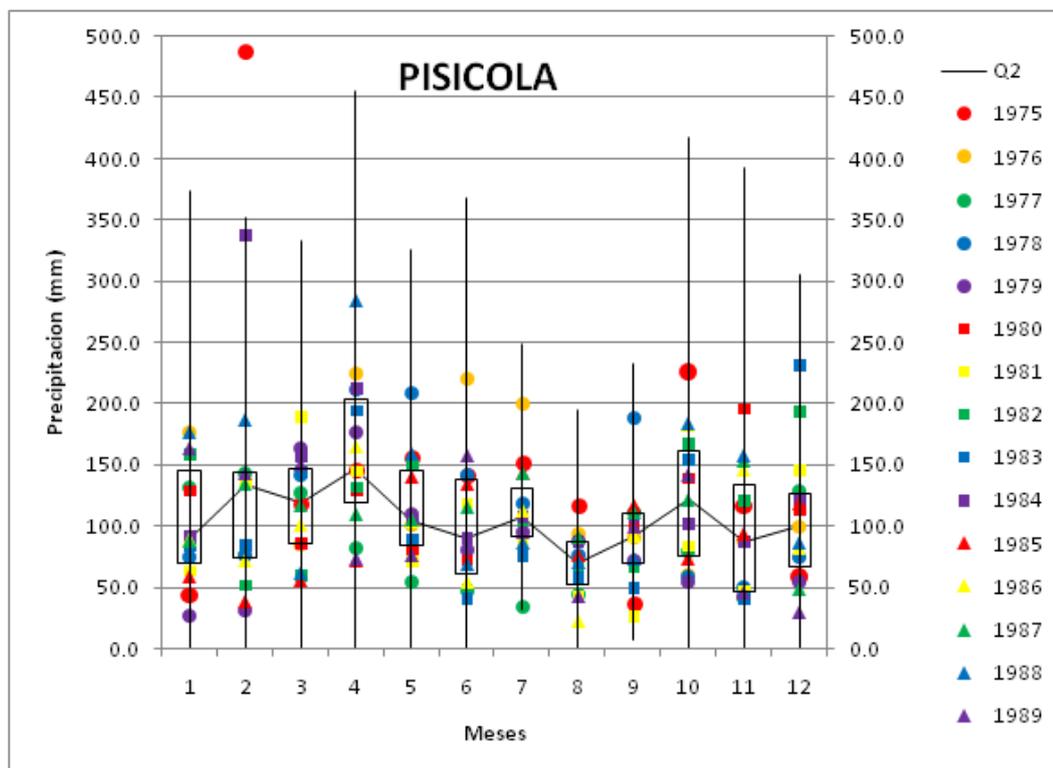


Figura A12: Diagrama de caja de la estación M417 Piscícola Chirimachay, periodo 1975 – 1989. Q2 es la mediana.

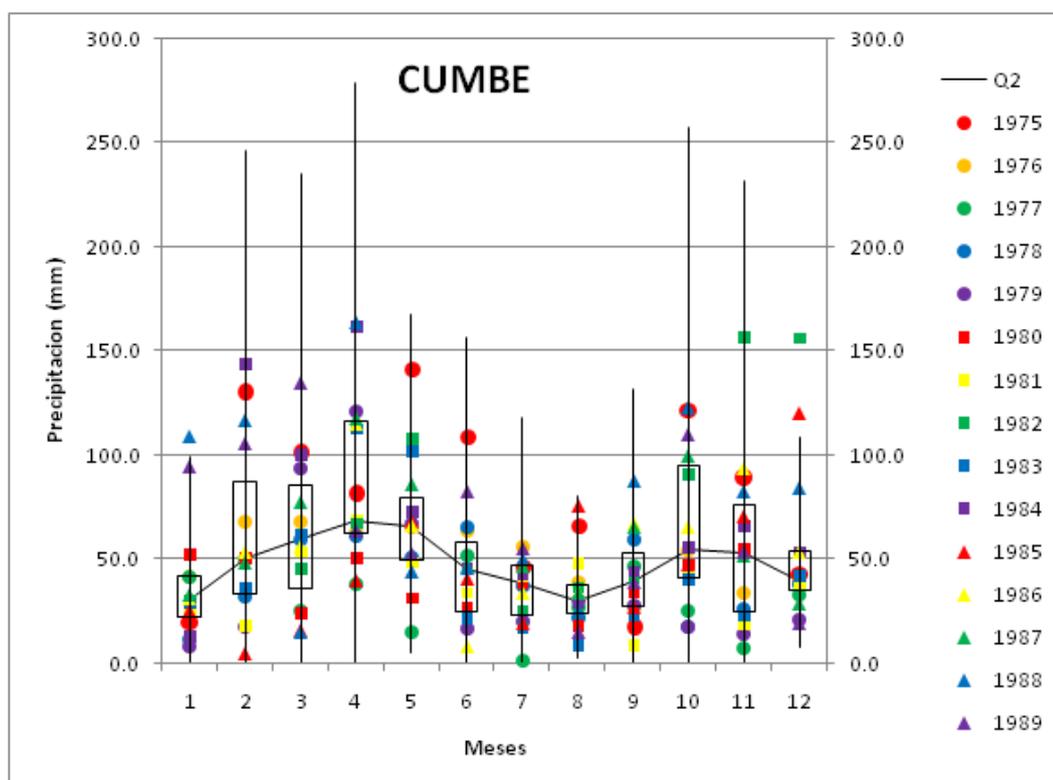


Figura A13: Diagrama de caja de la estación M418 Cumbe, periodo 1975 – 1989. Q2 es la mediana.

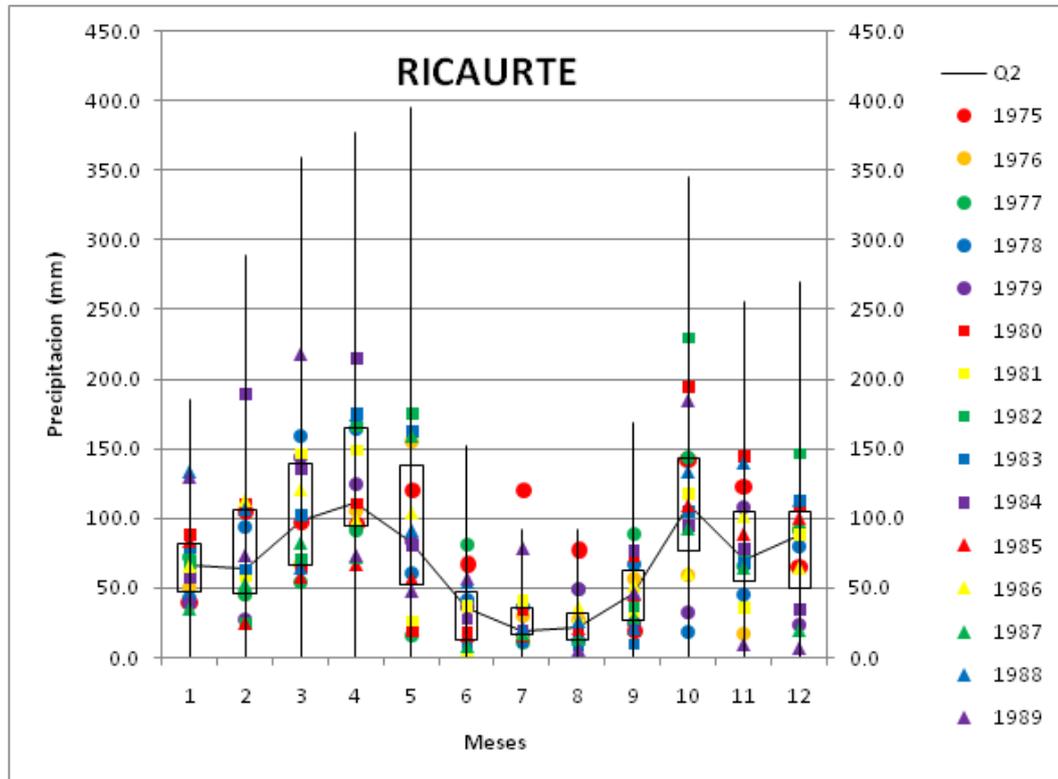


Figura A14: Diagrama de caja de la estación M426 Ricaurte, periodo 1975 – 1989. Q2 es la mediana.

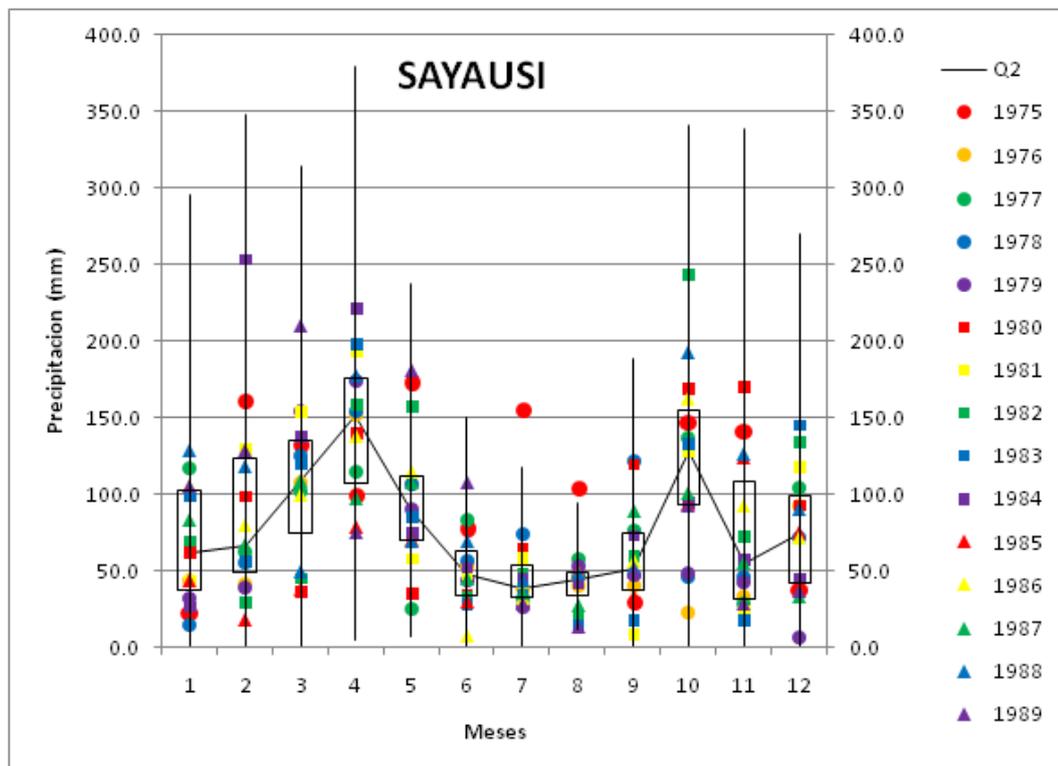


Figura A15: Diagrama de caja de la estación M427 Sayausí, periodo 1975 – 1989. Q2 es la mediana.

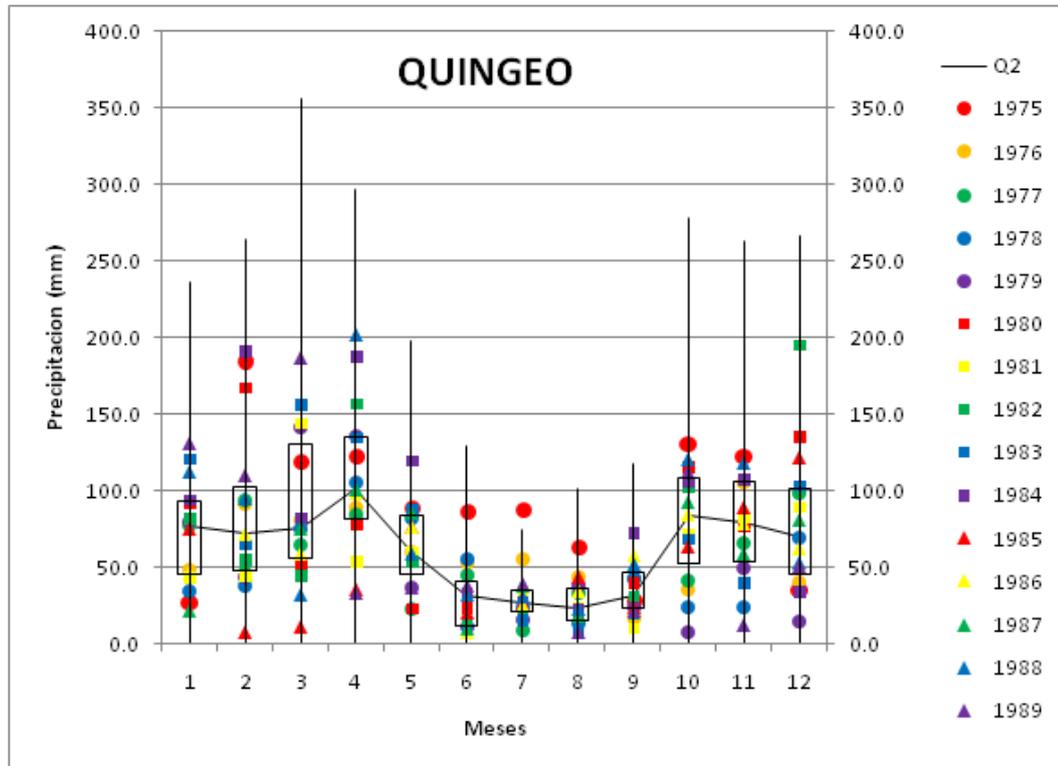


Figura A16: Diagrama de caja de la estación M541 CochapambaQuingeo, periodo 1975 – 1989. Q2 es la mediana.

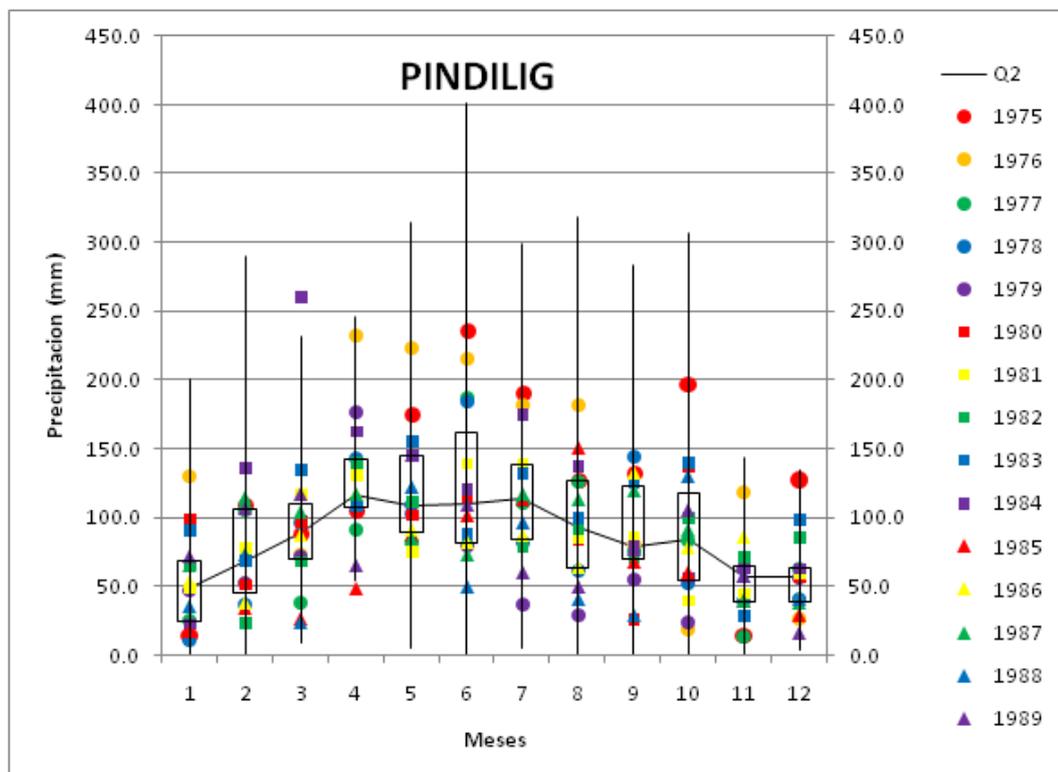


Figura A17: Diagrama de caja de la estación M583 Pindilíg, periodo 1975 – 1989. Q2 es la mediana.

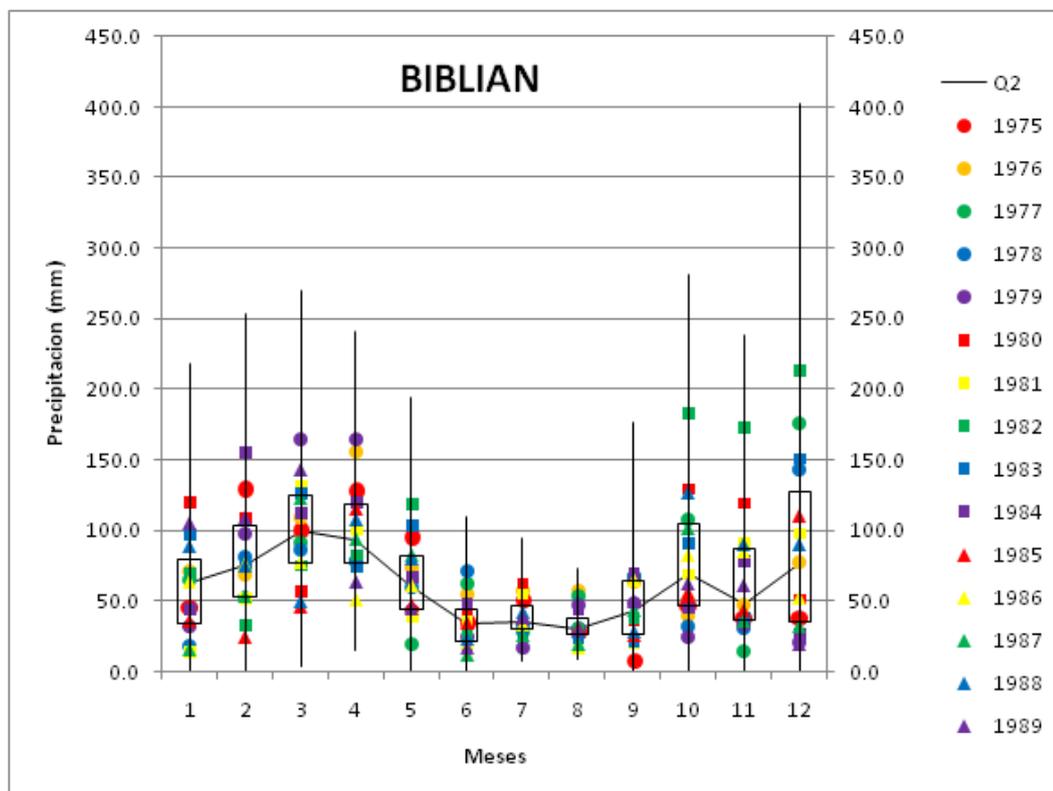


Figura A18: Diagrama de caja de la estación M625 BibliánInecel, periodo 1975 – 1989. Q2 es la mediana.

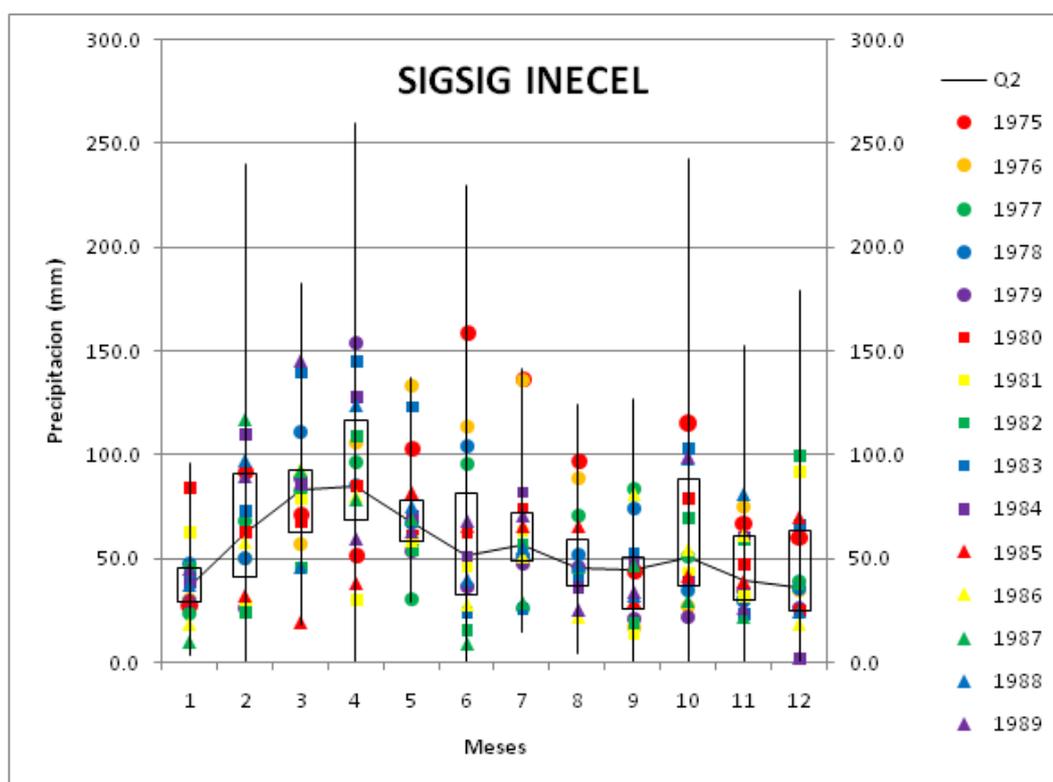


Figura A19: Diagrama de caja de la estación M664 SigsigInecel, periodo 1975 – 1989. Q2 es la mediana.

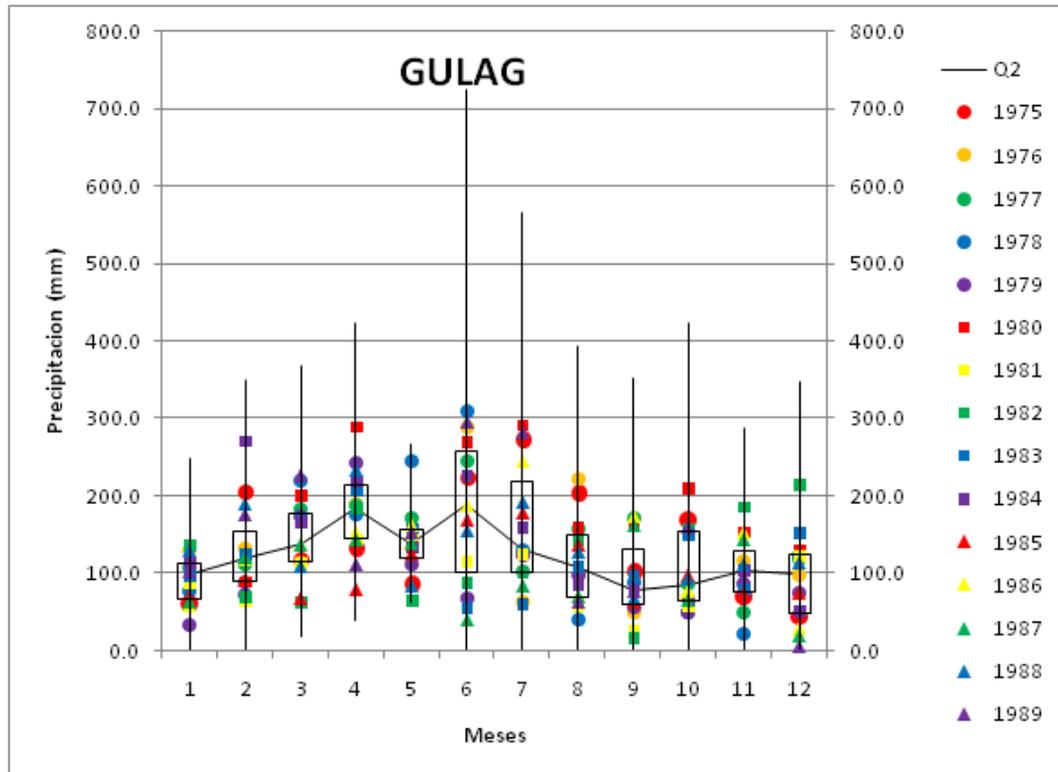


Figura A20: Diagrama de caja de la estación M668 Mataglo Gulag, periodo 1975 – 1989. Q2 es la mediana.

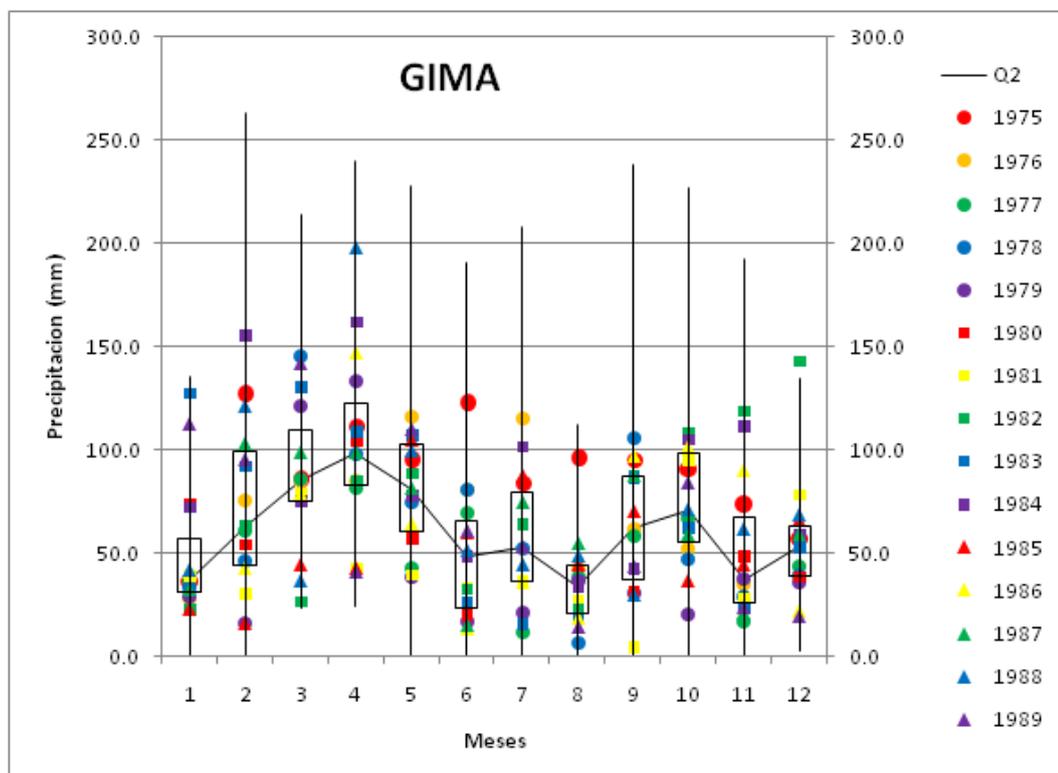


Figura A21: Diagrama de caja de la estación M669 Gima, periodo 1975 – 1989. Q2 es la mediana.

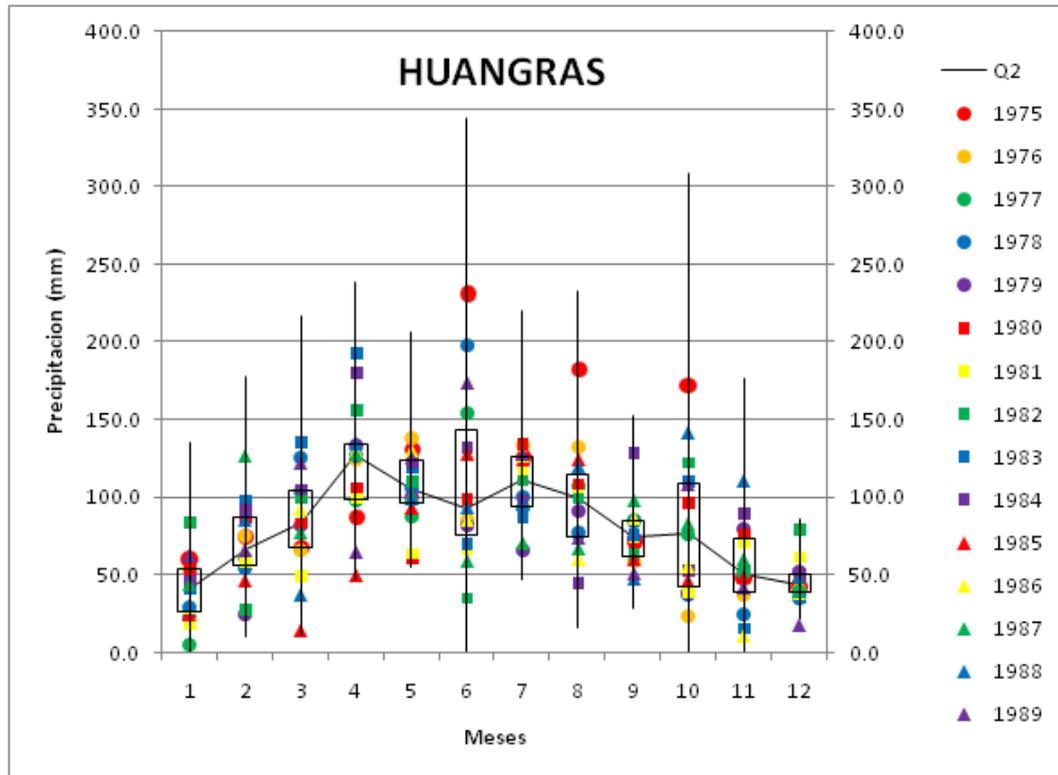


Figura A22: Diagrama de caja de la estación M671 Huangras, periodo 1975 – 1989. Q2 es la mediana.

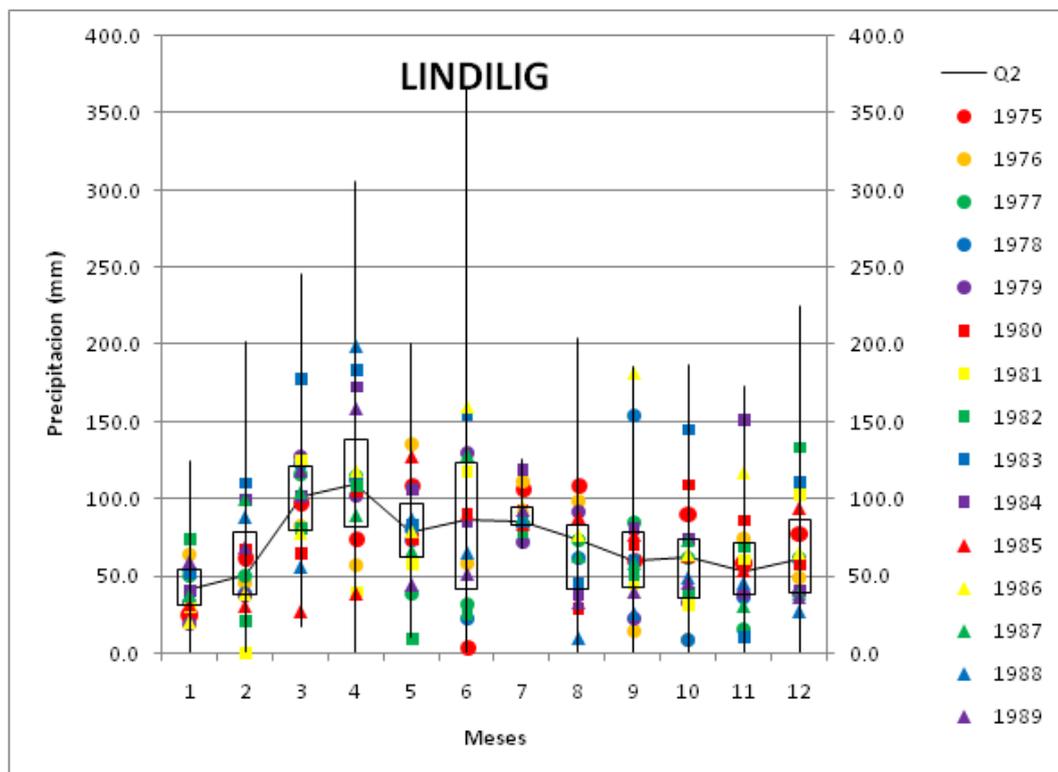


Figura A23: Diagrama de caja de la estación M686 Lindilig, periodo 1975 – 1989. Q2 es la mediana.



## Anexo B

### Histogramas de series de datos mensuales de precipitación por estaciones

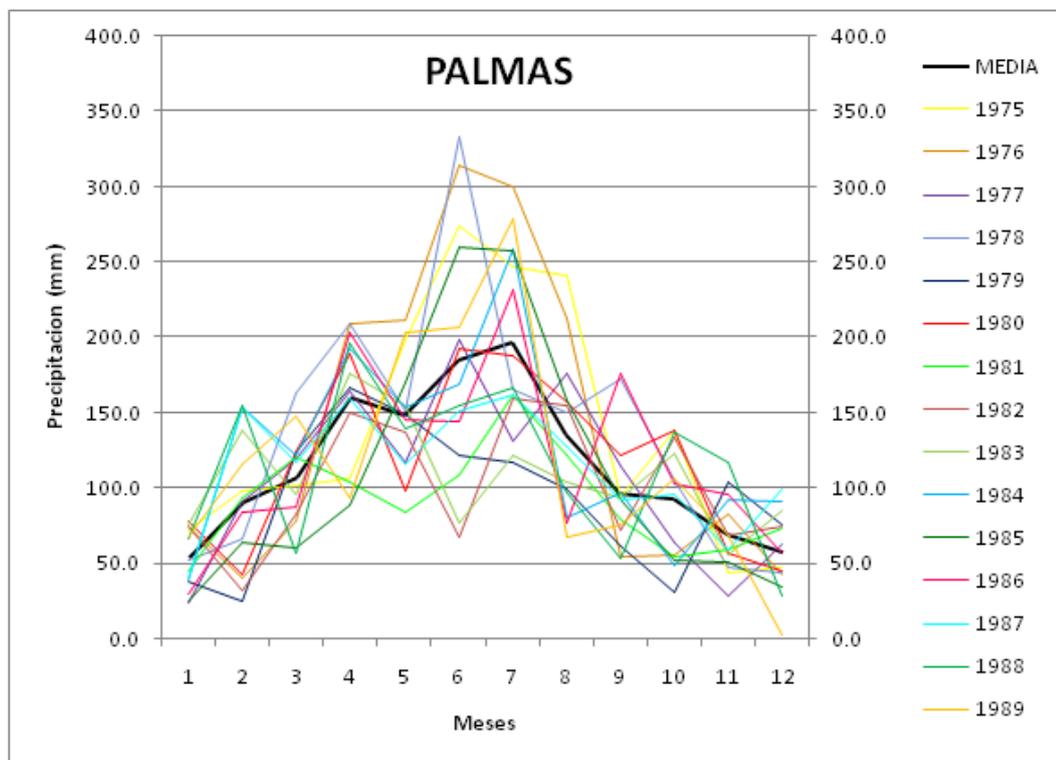


Figura B1: Histograma de precipitaciones de la estación M045 Palmas, periodo 1975 – 1989.

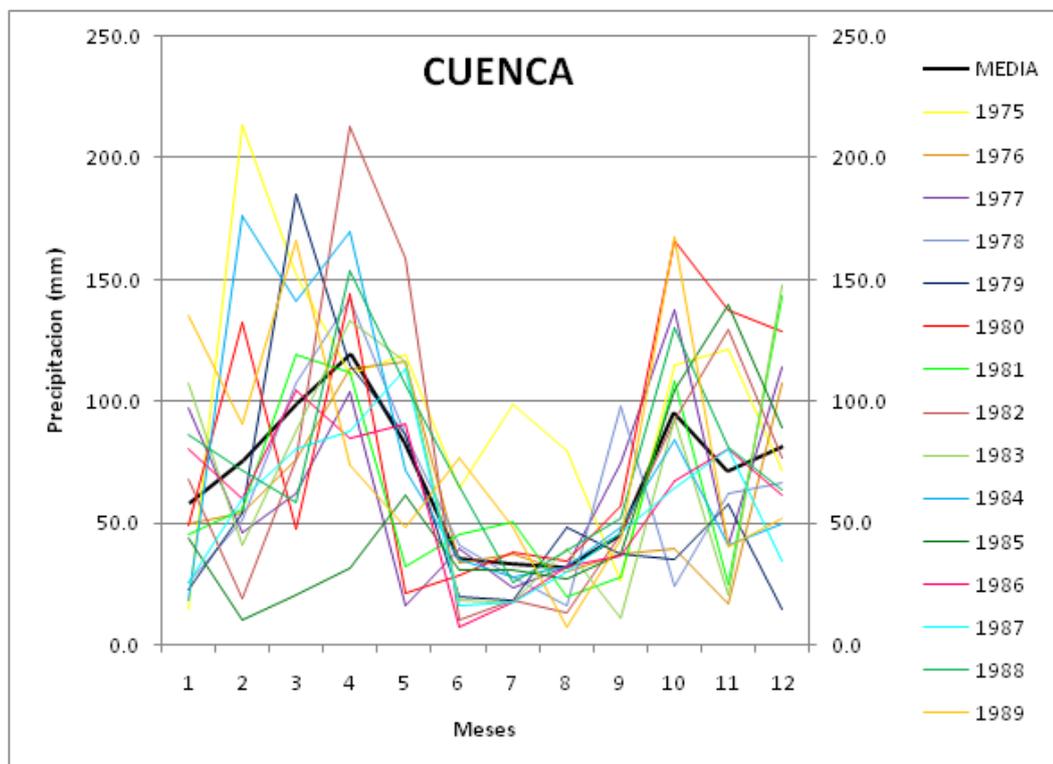


Figura B2: Histograma de precipitaciones de la estación M067 Cuenca, periodo 1975 – 1989.

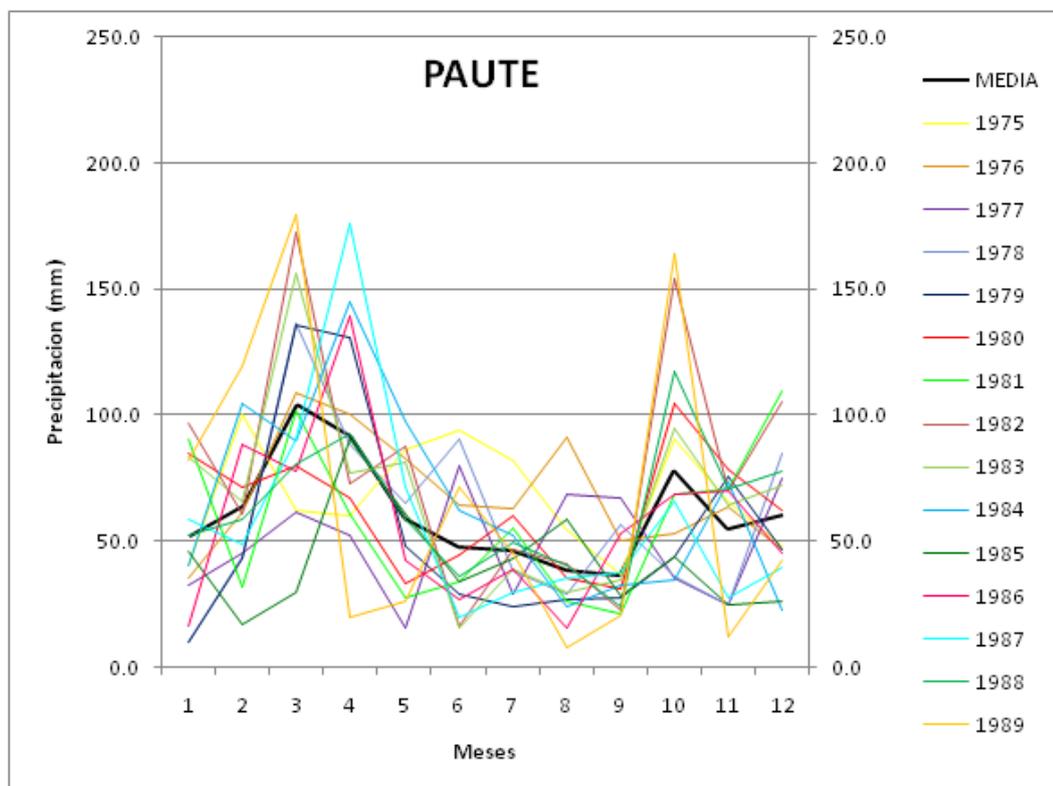


Figura B3: Histograma de precipitaciones de la estación M138 Paute, periodo 1975 – 1989.

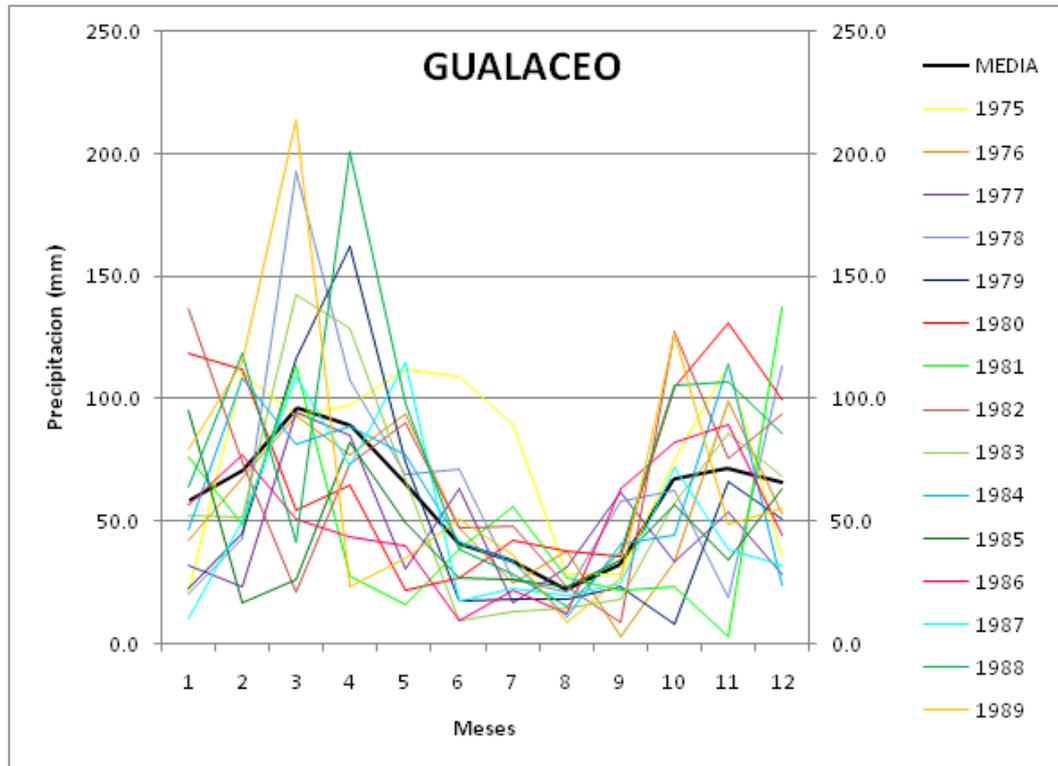


Figura B4: Histograma de precipitaciones de la estación M139 Gualaceo, periodo 1975 – 1989.

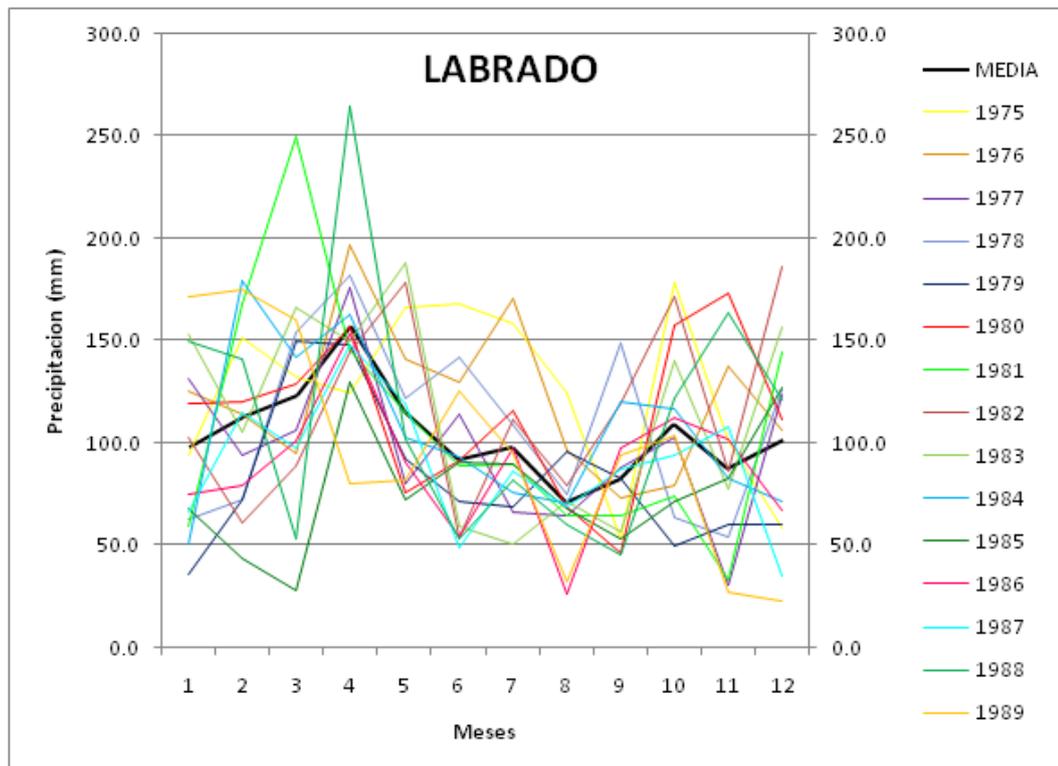


Figura B5: Histograma de precipitaciones de la estación M141 El Labrado, periodo 1975 – 1989.

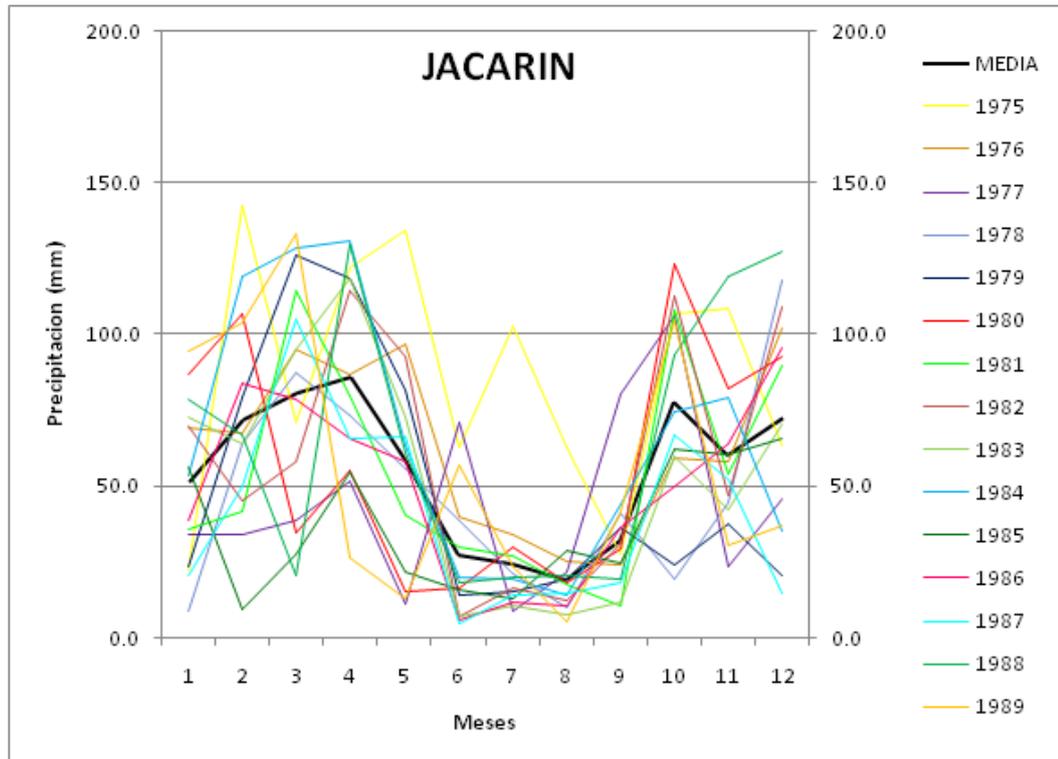


Figura B6: Histograma de precipitaciones de la estación M197 Jacarín, periodo 1975 – 1989.

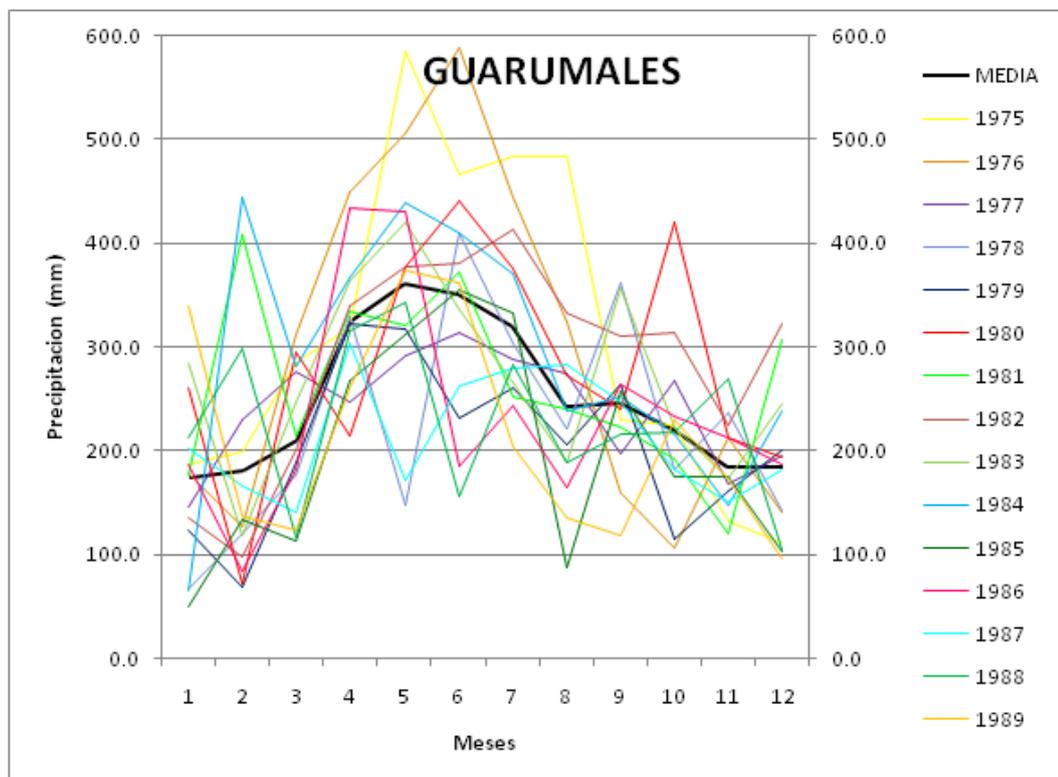


Figura B7: Histograma de precipitaciones de la estación M206 Guarumales, periodo 1975 – 1989.

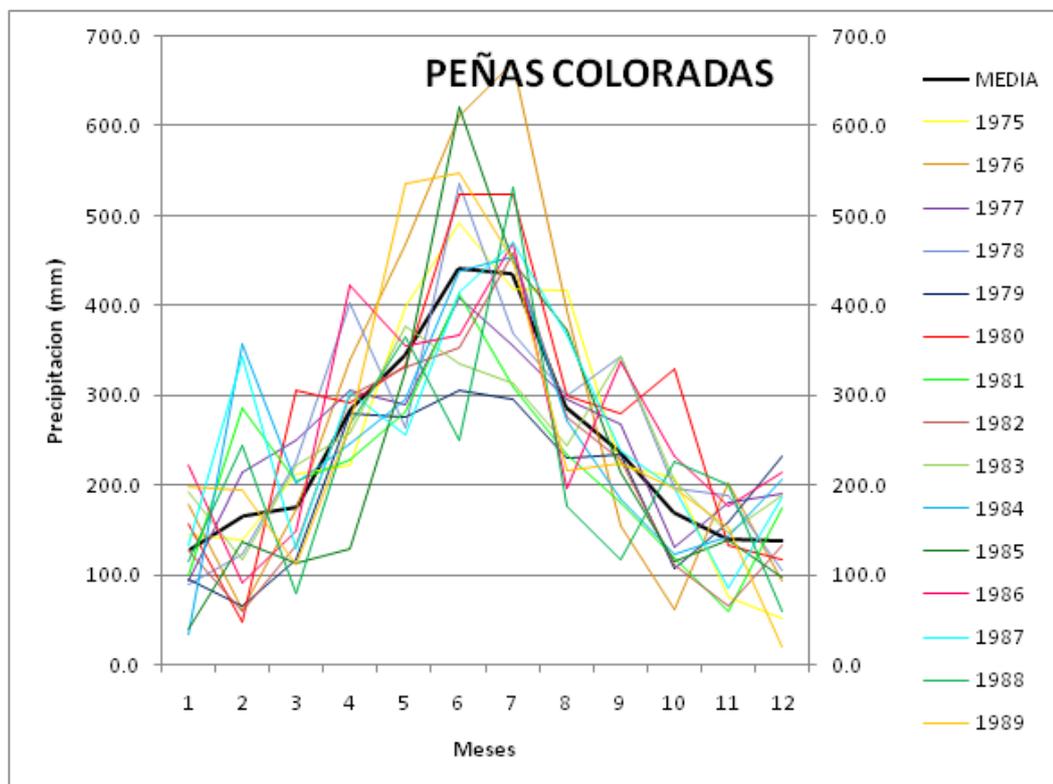


Figura B8: Histograma de precipitaciones de la estación M217 Peñas Coloradas, periodo 1975 – 1989.

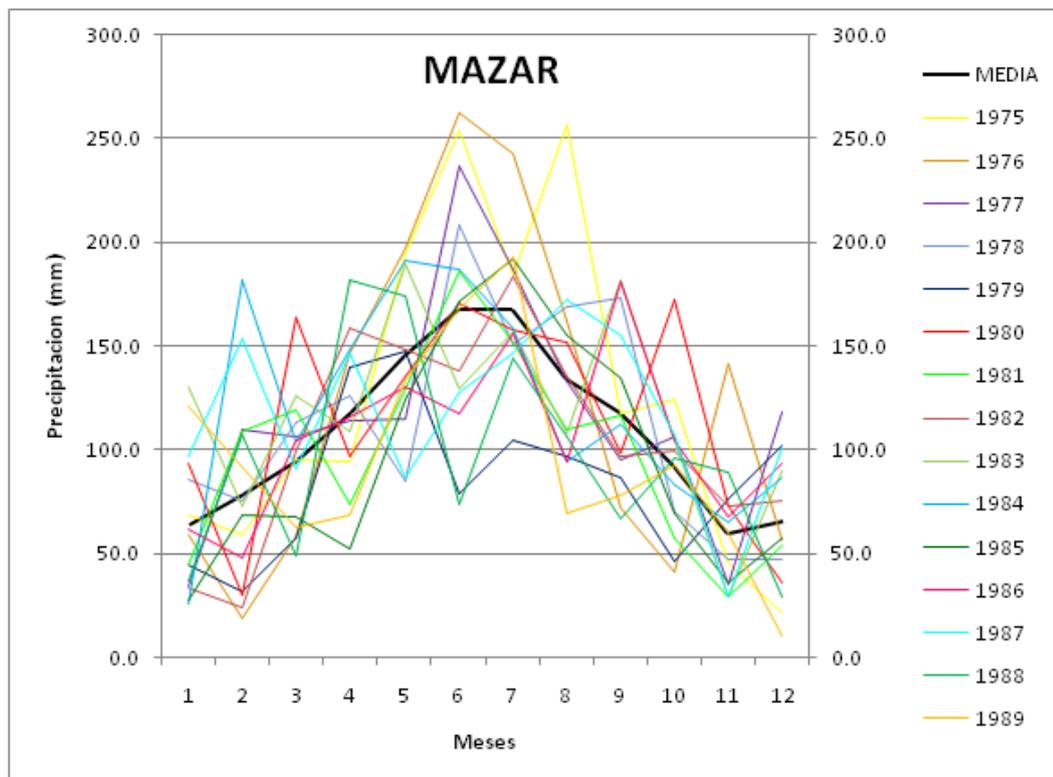


Figura B9: Histograma de precipitaciones de la estación M410 Mazar Rivera, periodo 1975 – 1989.

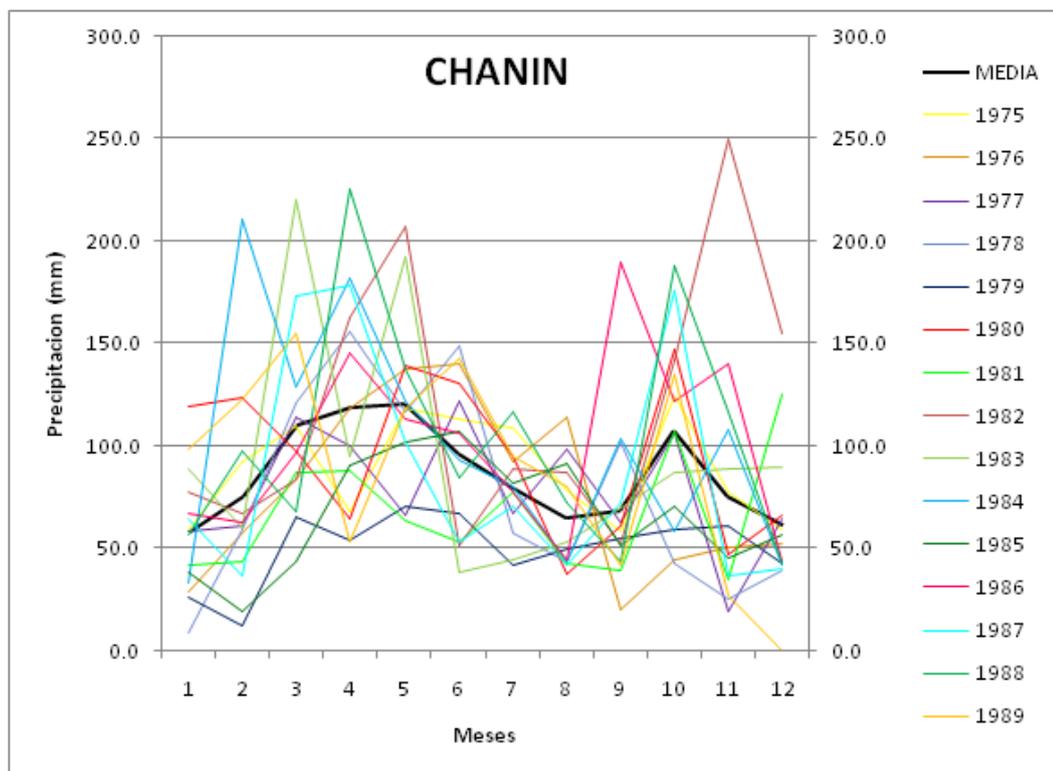


Figura B10: Histograma de precipitaciones de la estación M414 Chanín, periodo 1975 – 1989.

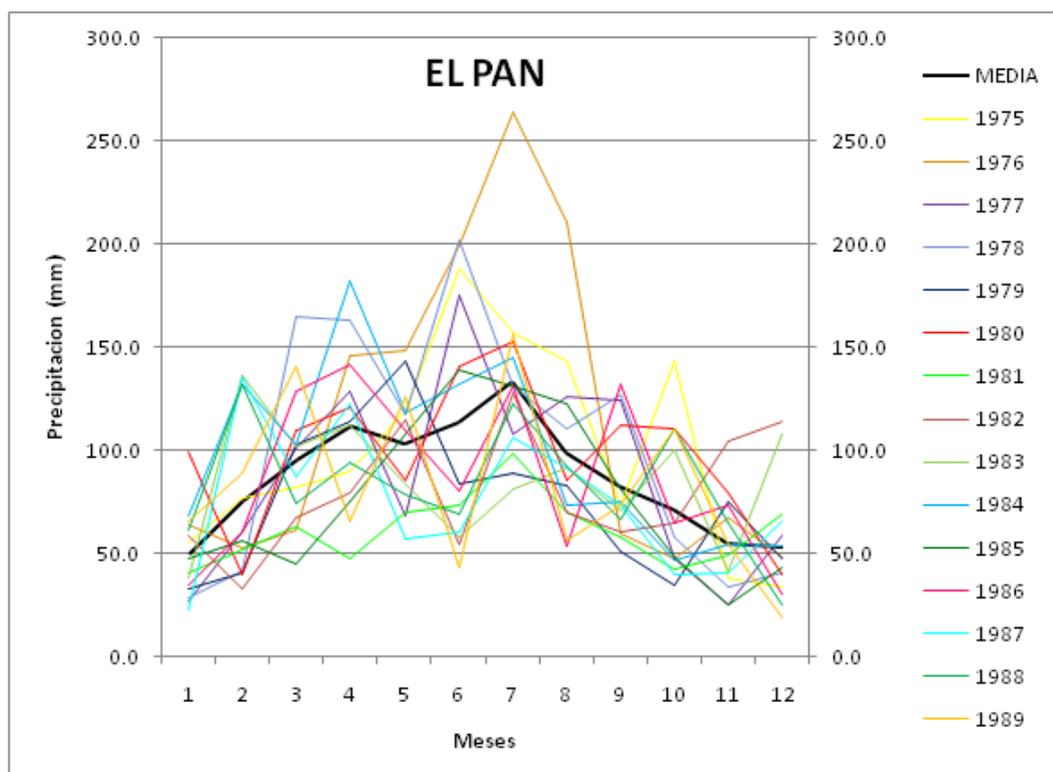


Figura B11: Histograma de precipitaciones de la estación M416 El Pan, periodo 1975 – 1989.

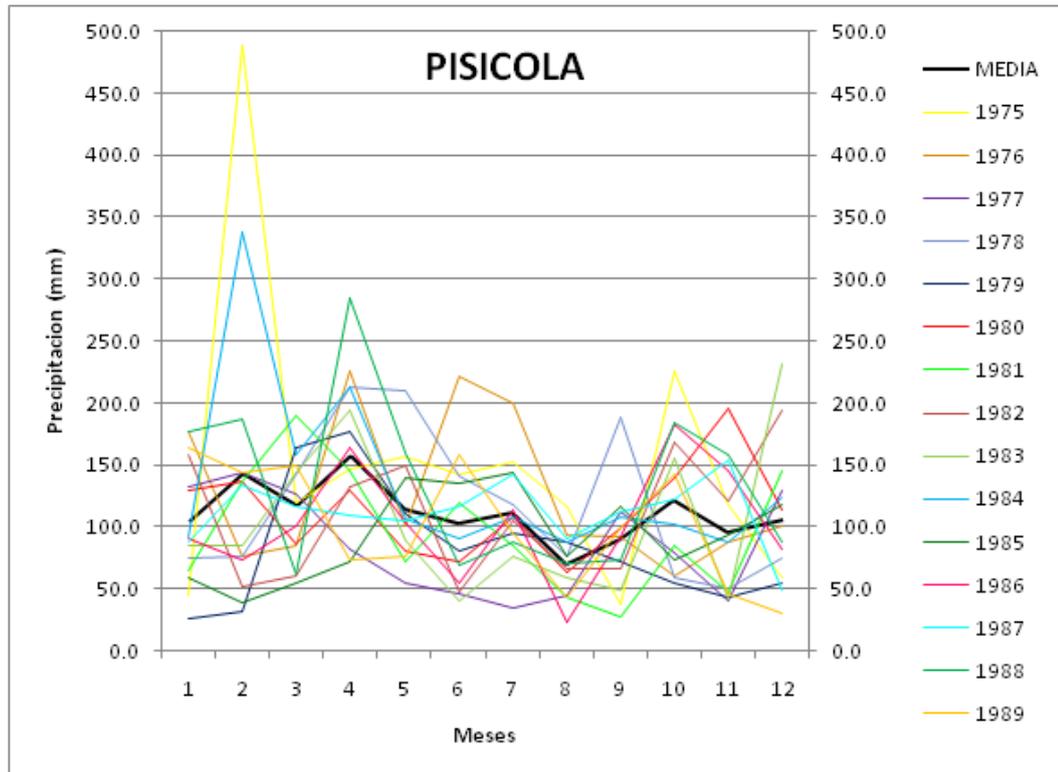


Figura B12: Histograma de precipitaciones de la estación M417 Piscícola Chirimachay, periodo 1975 – 1989.

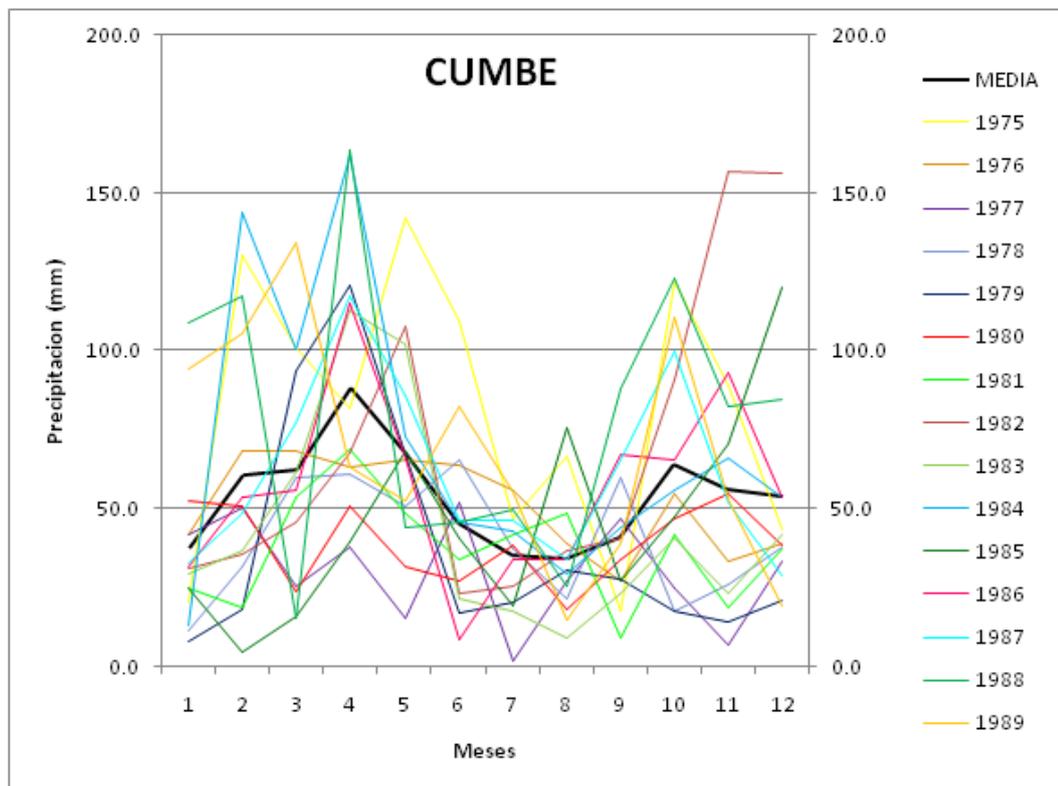


Figura B13: Histograma de precipitaciones de la estación M418 Cumbe, periodo 1975 – 1989.

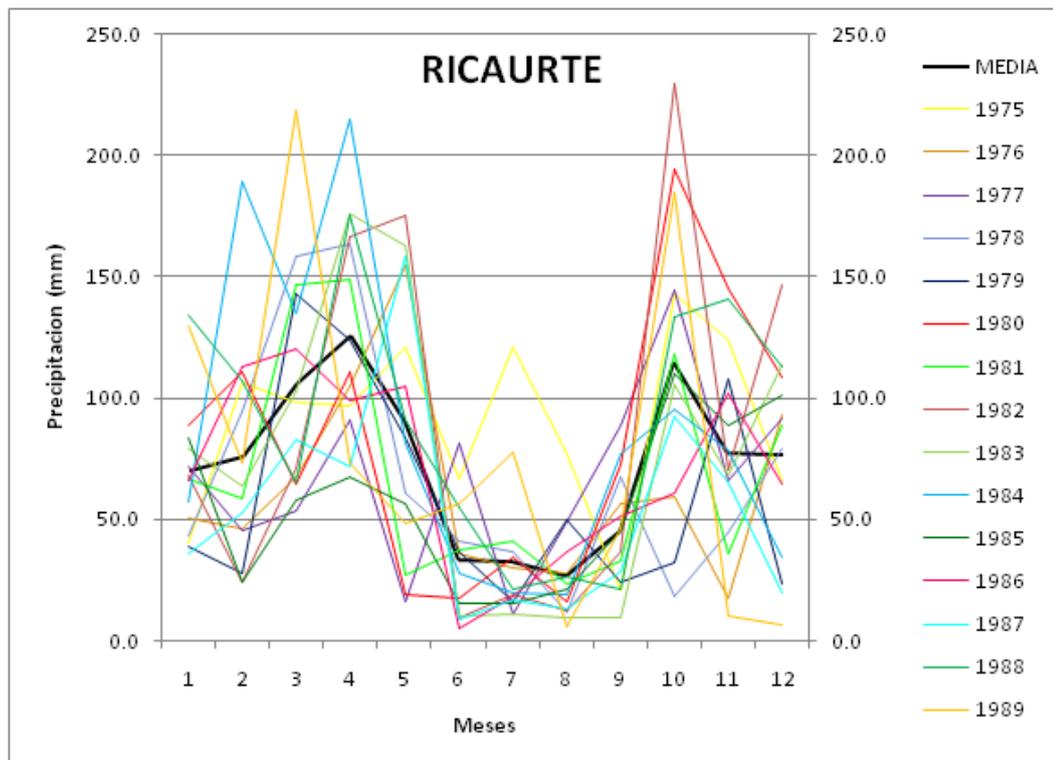


Figura B14: Histograma de precipitaciones de la estación M426 Ricaurte, periodo 1975 – 1989.

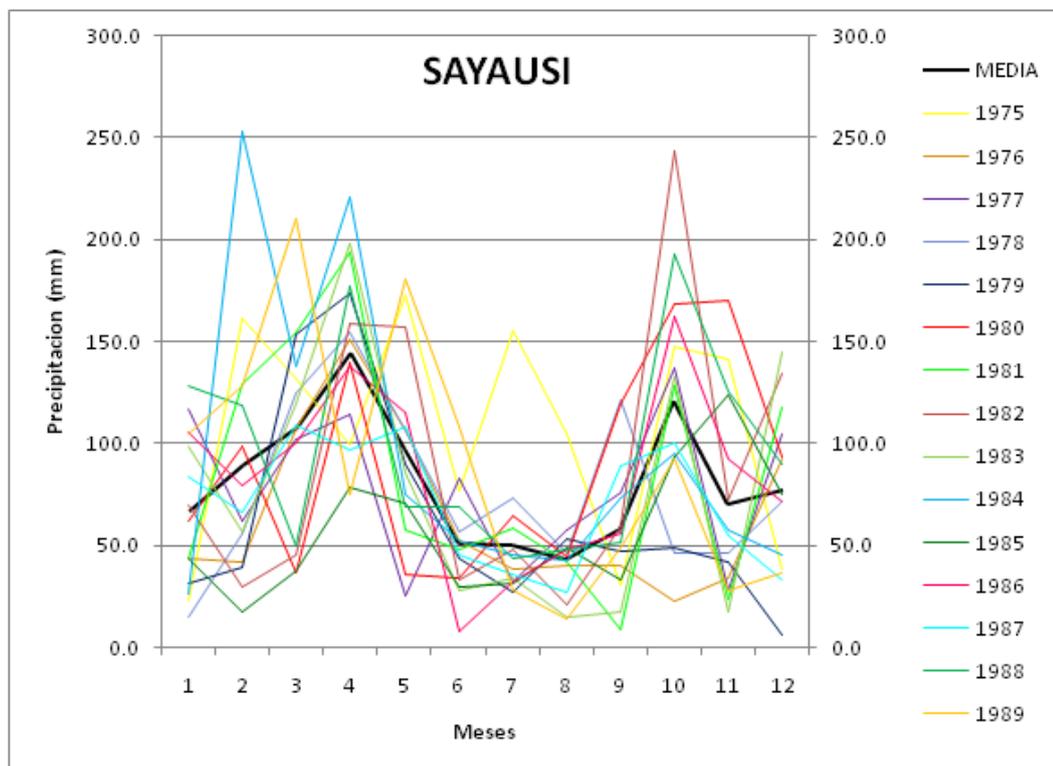


Figura B15: Histograma de precipitaciones de la estación M427 Sayausí, periodo 1975 – 1989.

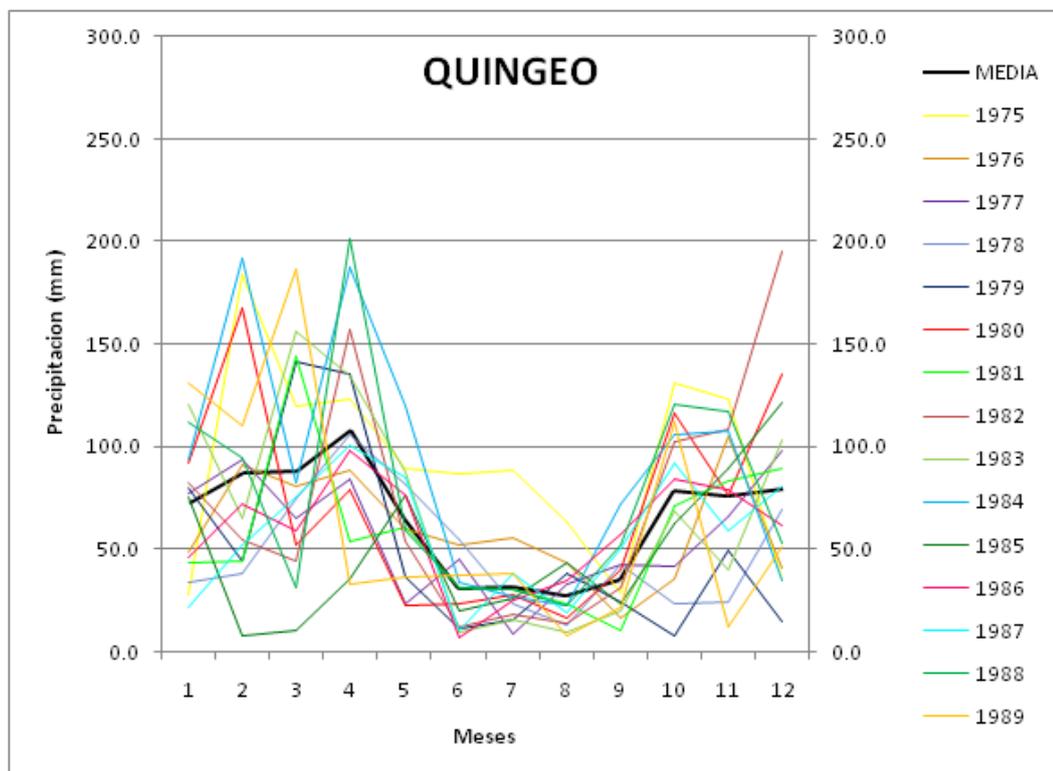


Figura B16: Histograma de precipitaciones de la estación M541 CochapambaQuingeo, periodo 1975 – 1989.

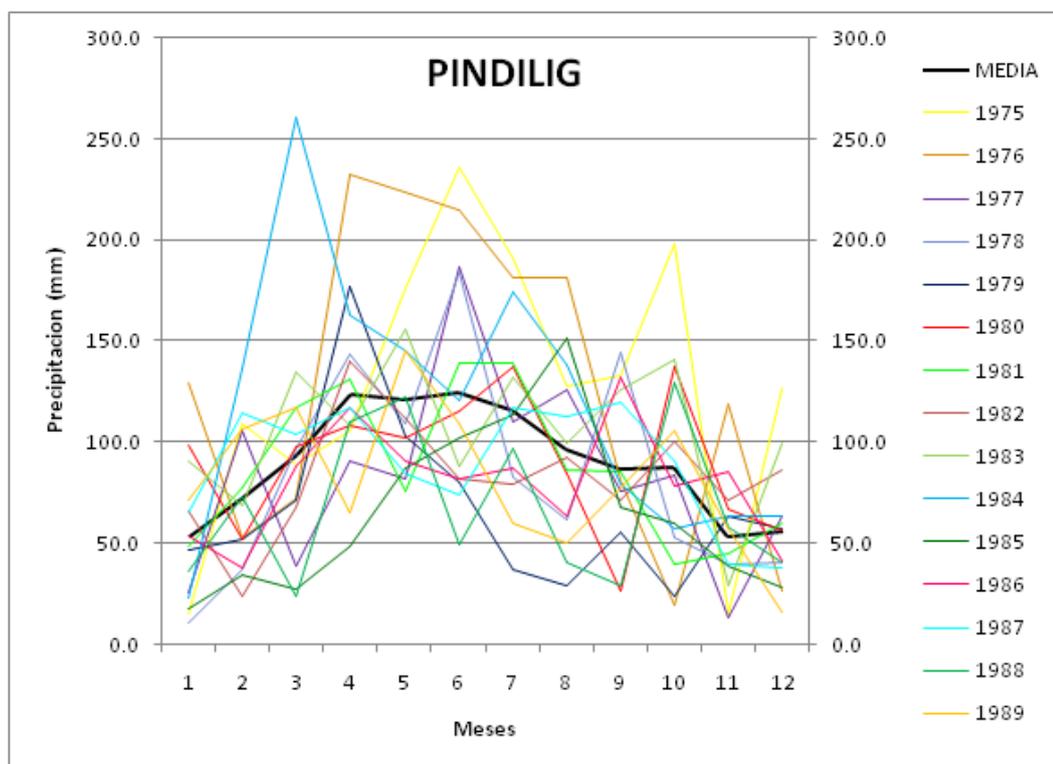


Figura B17: Histograma de precipitaciones de la estación M583 Pindilíg, periodo 1975 – 1989.

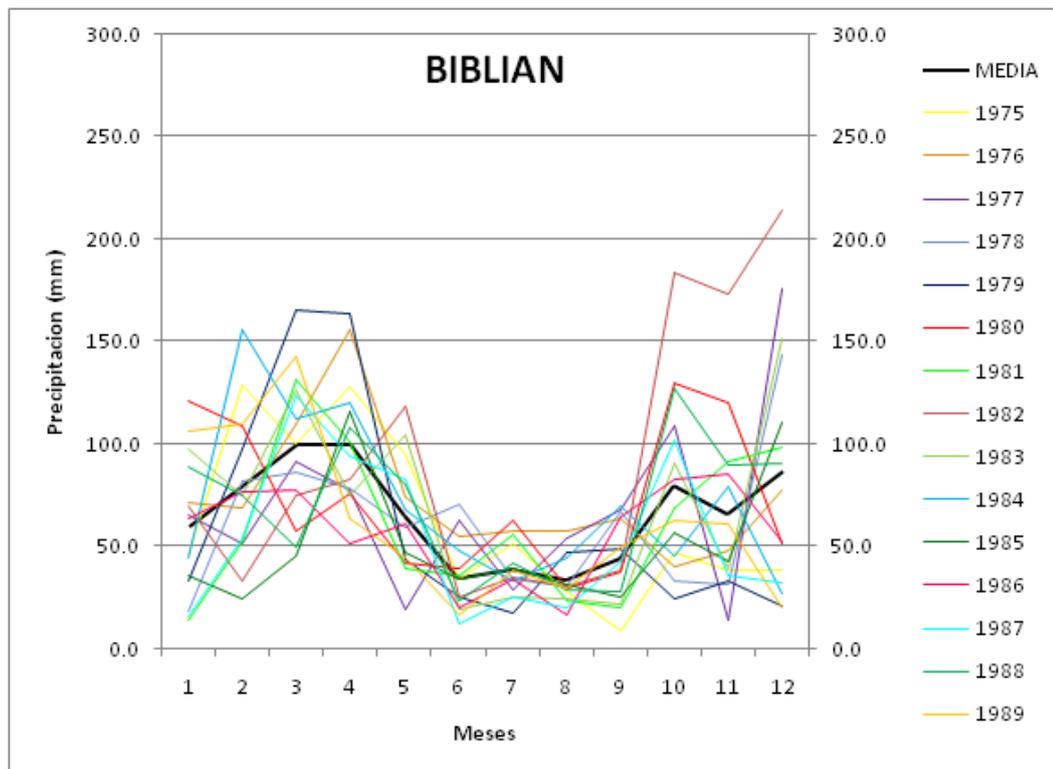


Figura B18: Histograma de precipitaciones de la estación M625 Biblián, periodo 1975 – 1989.

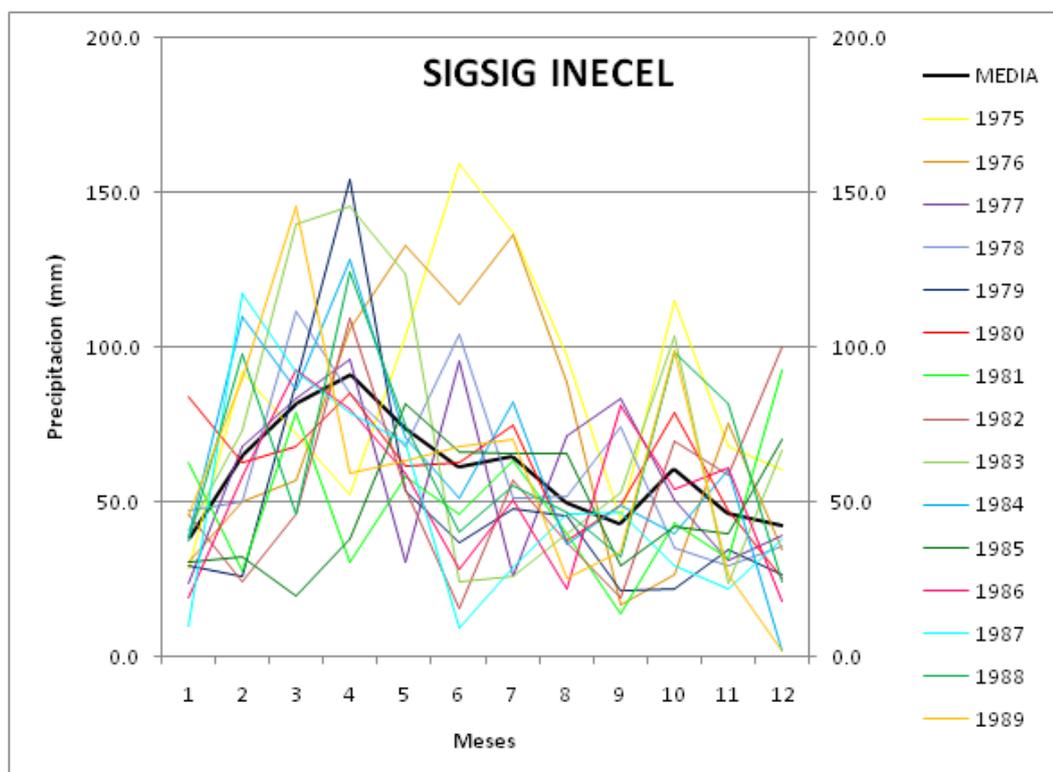


Figura B19: Histograma de precipitaciones de la estación M664 Sigsig, periodo 1975 – 1989.

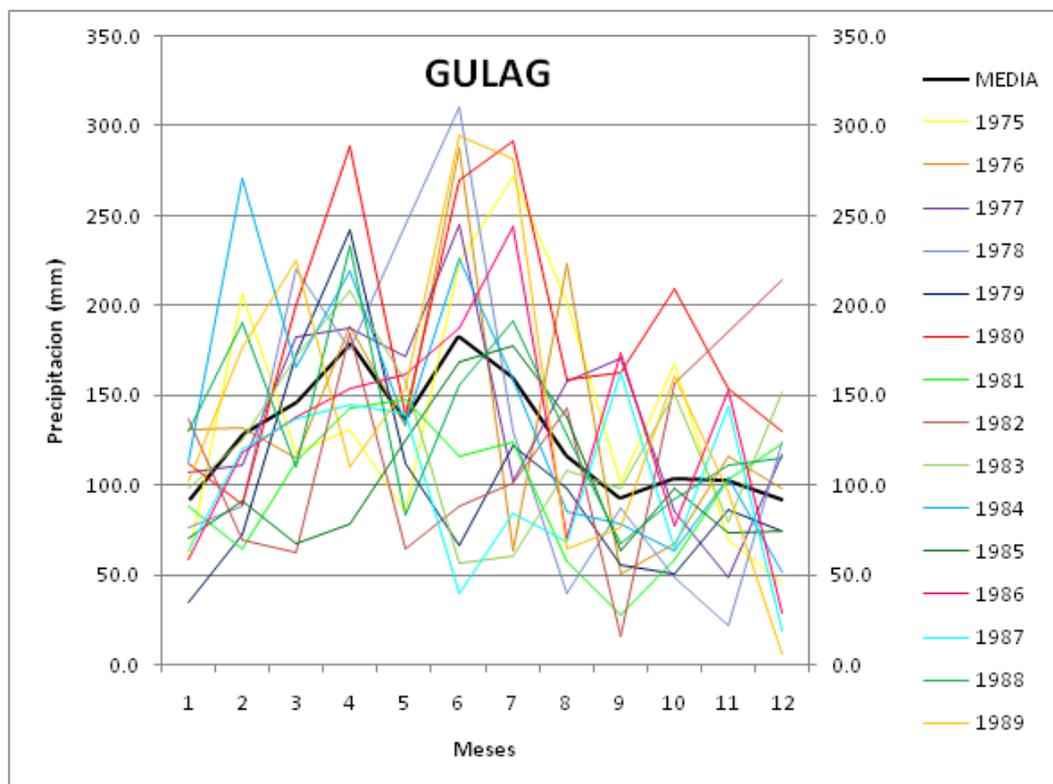


Figura B20: Histograma de precipitaciones de la estación M668 Mataglo Gulag, periodo 1975 – 1989.

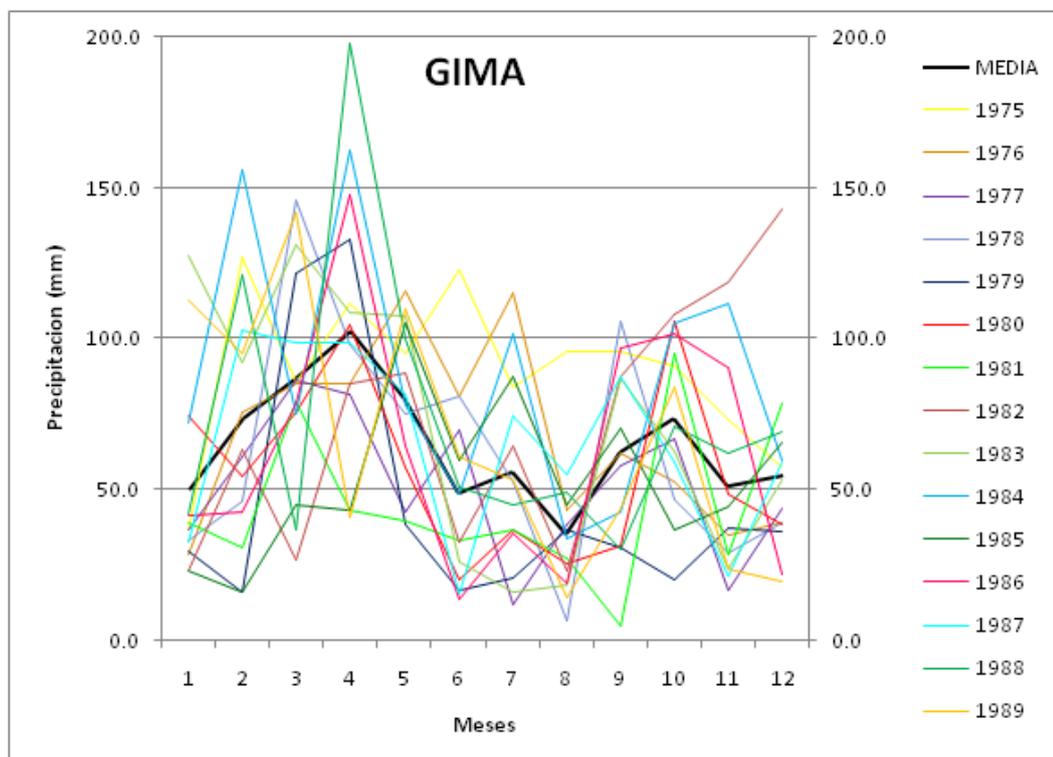


Figura B21: Histograma de precipitaciones de la estación M669 Gima, periodo 1975 – 1989.

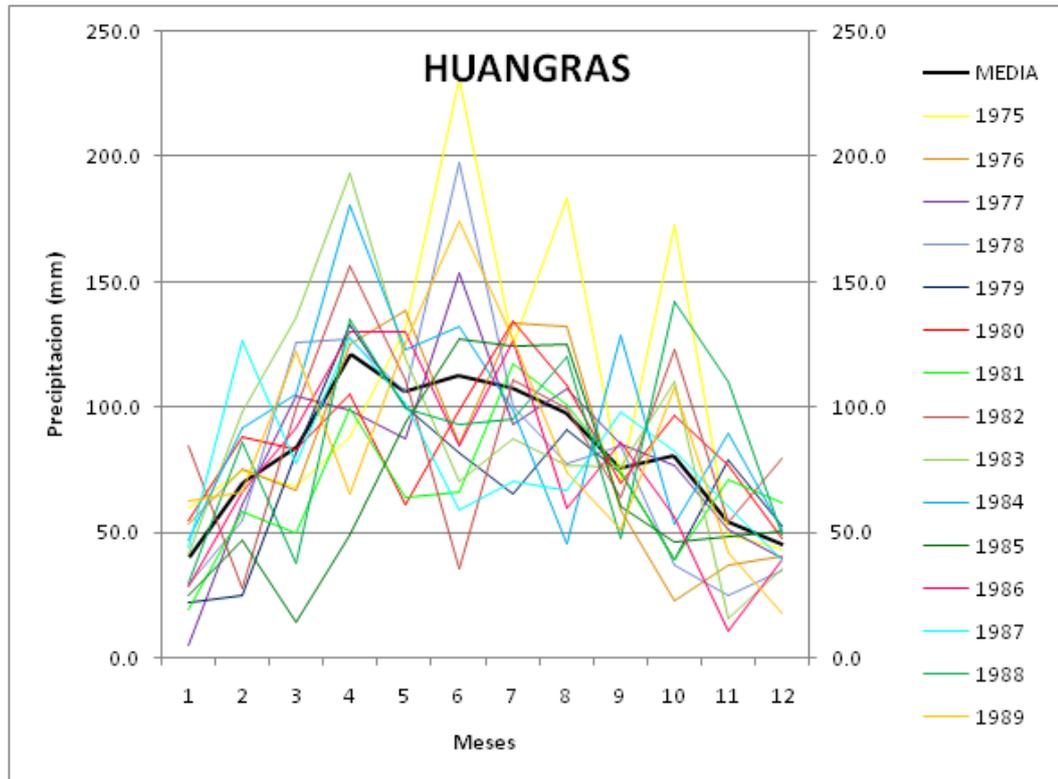


Figura B22: Histograma de precipitaciones de la estación M671 Huangras, periodo 1975 – 1989.

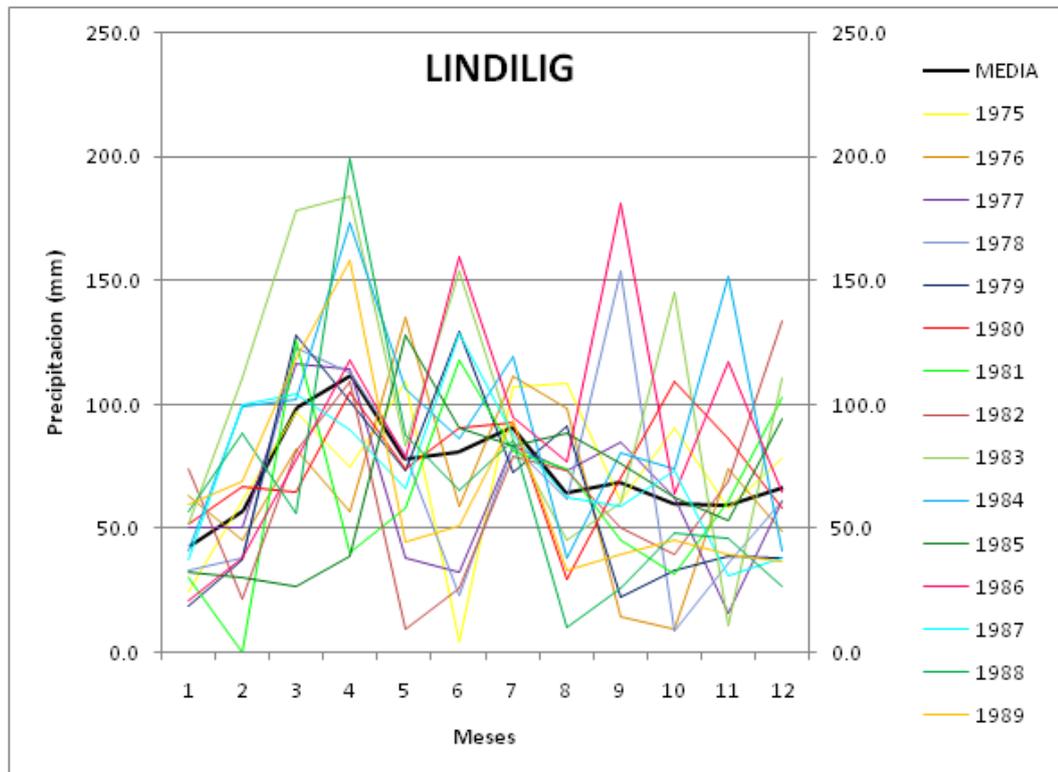


Figura B23: Histograma de precipitaciones de la estación M686 Lindilig, periodo 1975 – 1989.



## Anexo C

### Histogramas mensuales de precipitación de estaciones de medición

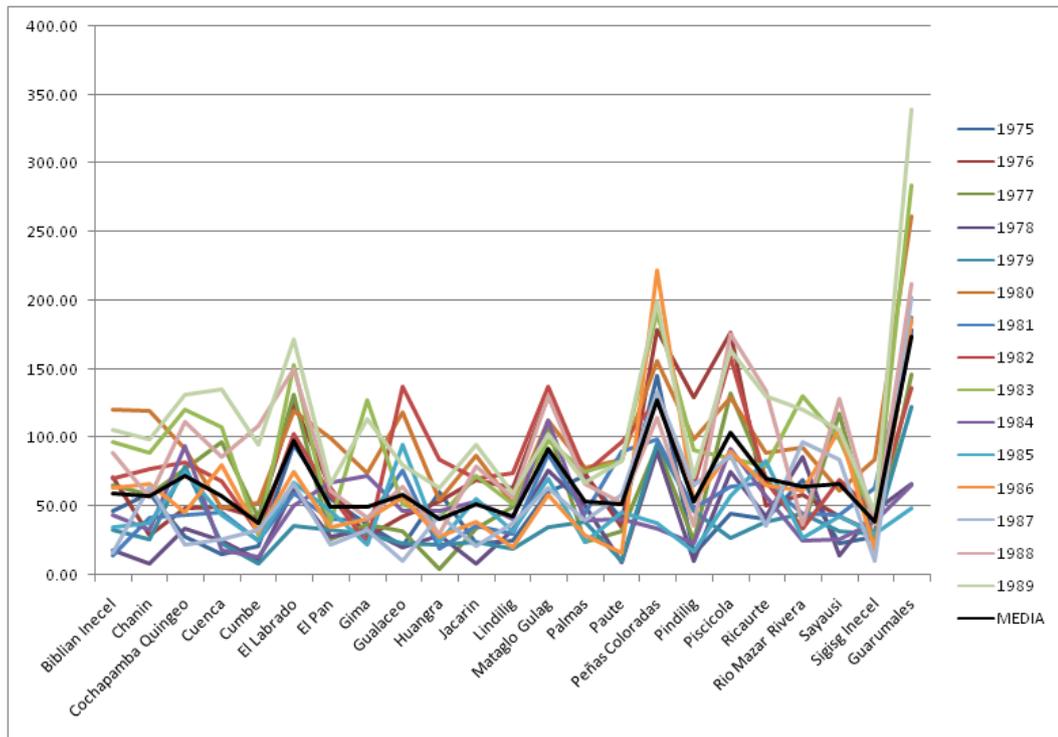


Figura C1: Histograma de precipitaciones del mes de enero, periodo 1975 – 1989

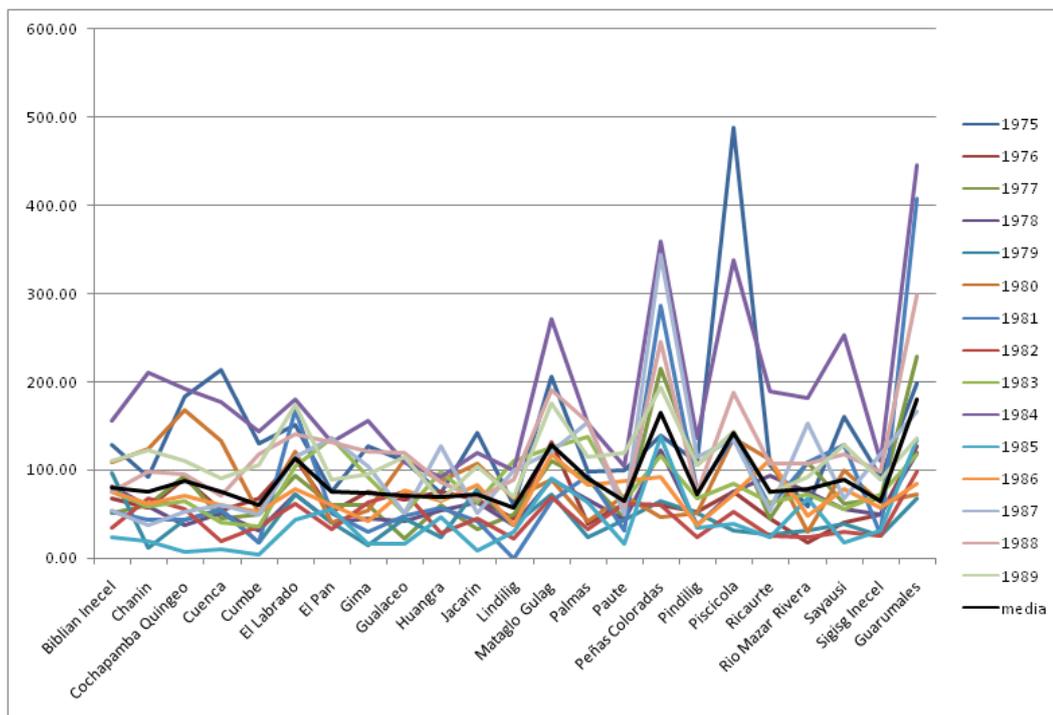


Figura C2: Histograma de precipitaciones del mes de febrero, periodo 1975 – 1989

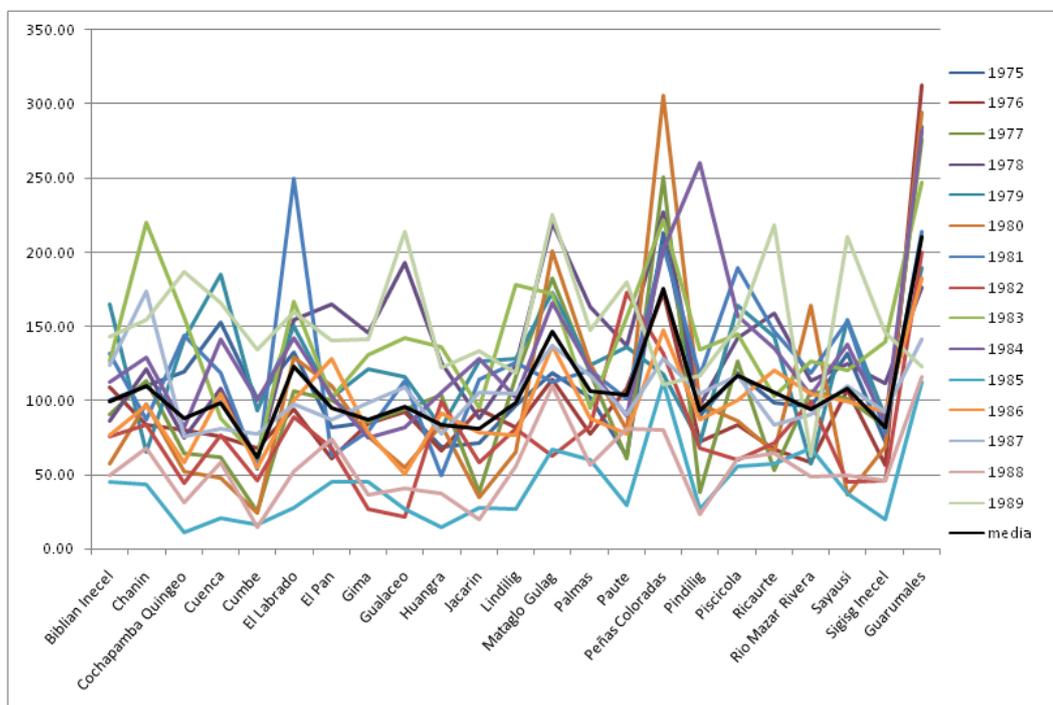


Figura C3: Histograma de precipitaciones del mes de marzo, periodo 1975 – 1989

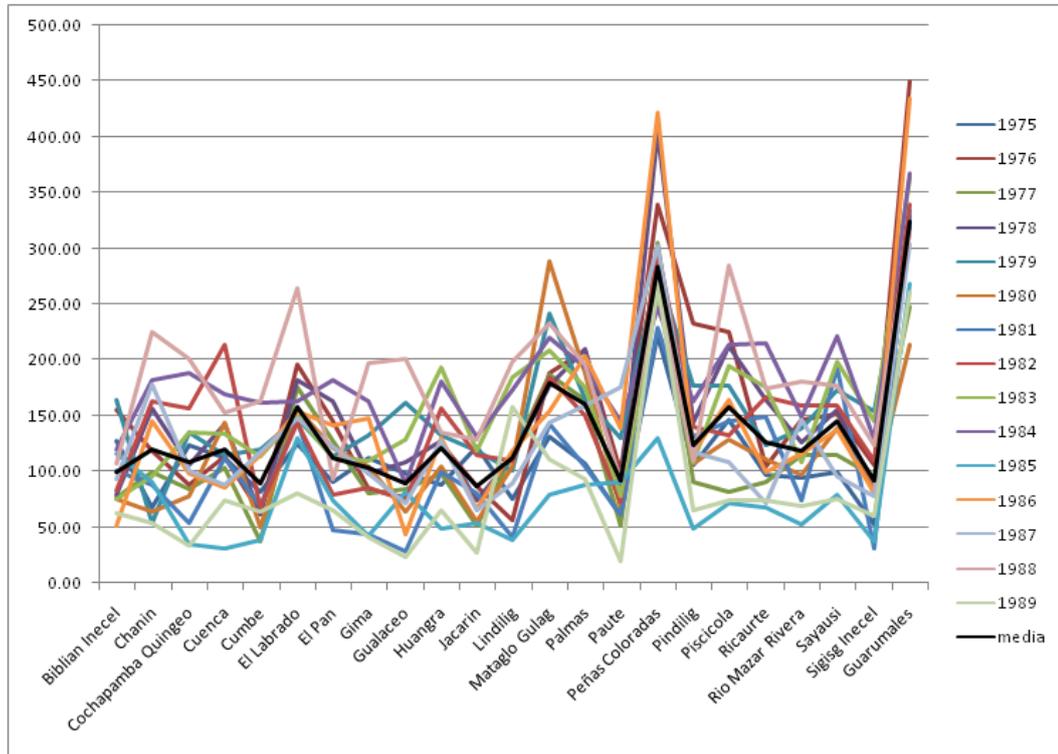


Figura C4: Histograma de precipitaciones del mes de abril, periodo 1975 – 1989

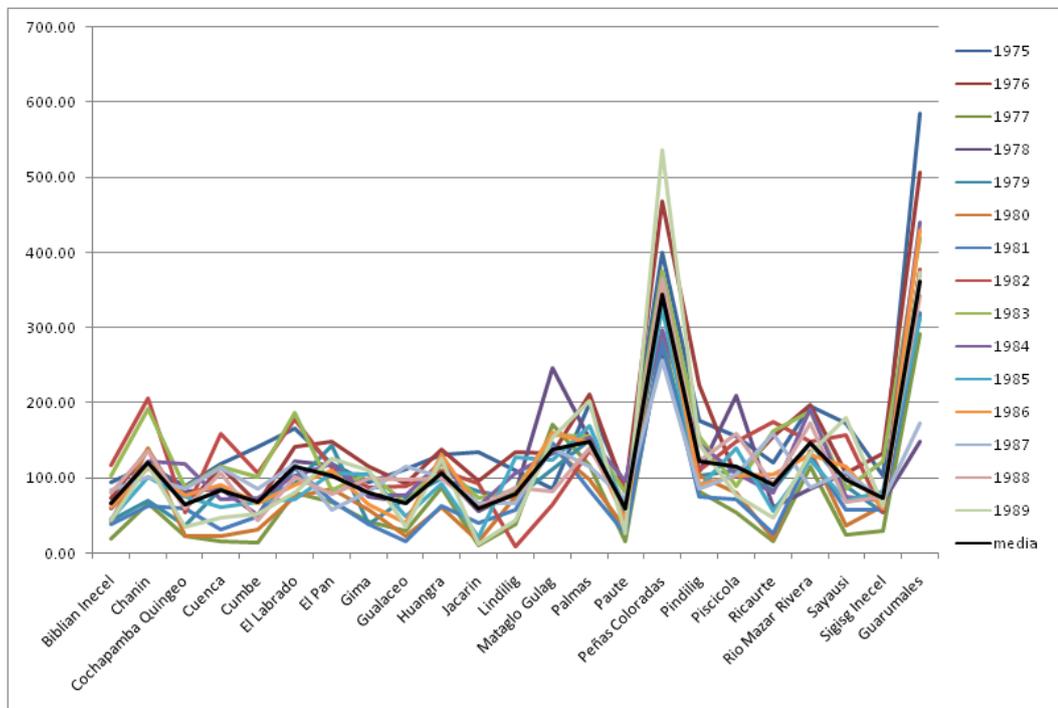


Figura C5: Histograma de precipitaciones del mes de mayo, periodo 1975 – 1989

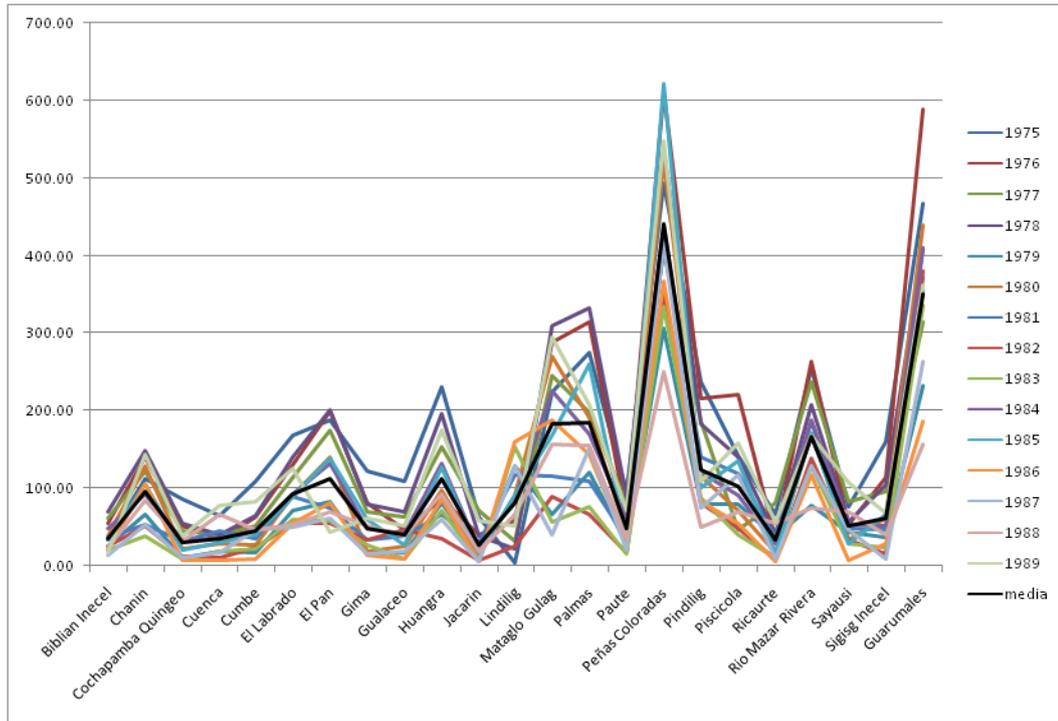


Figura C6: Histograma de precipitaciones del mes de junio, periodo 1975 – 1989

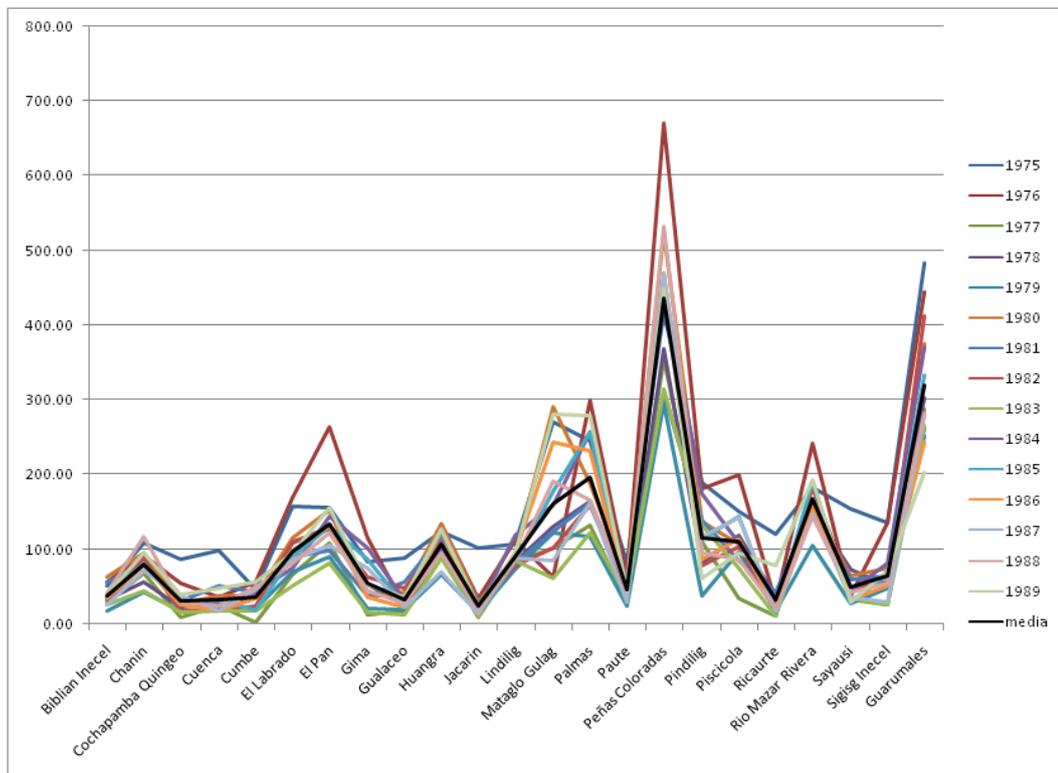


Figura C7: Histograma de precipitaciones del mes de julio, periodo 1975 – 1989

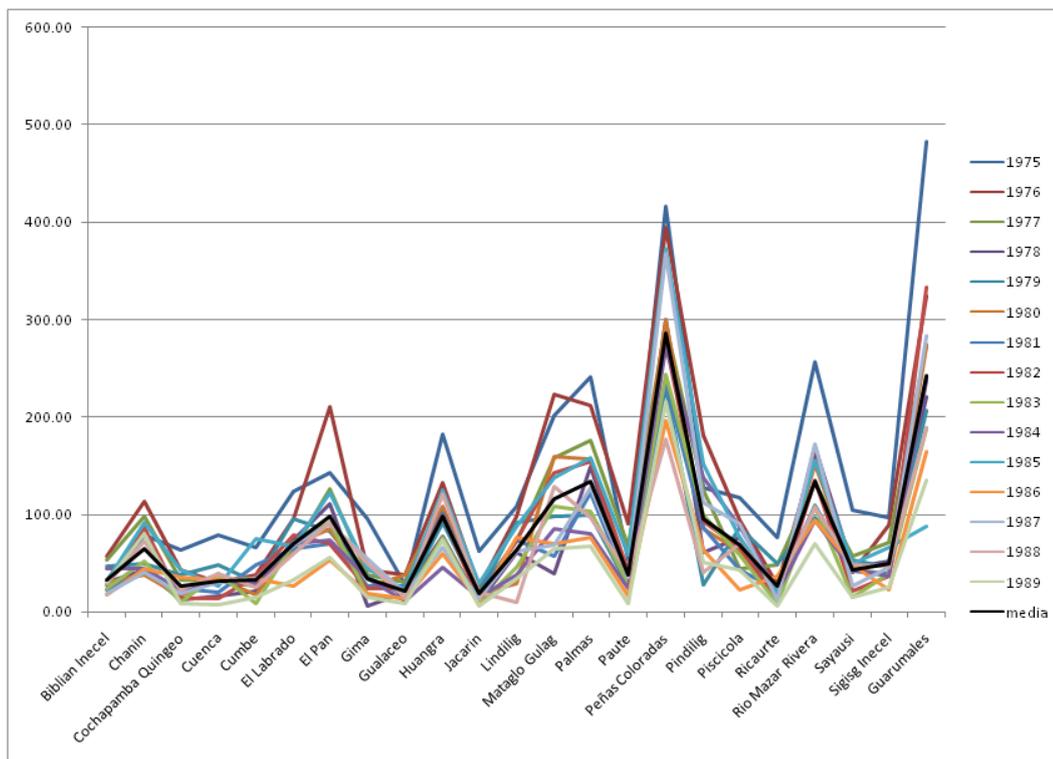


Figura C8: Histograma de precipitaciones del mes de agosto, periodo 1975 – 1989

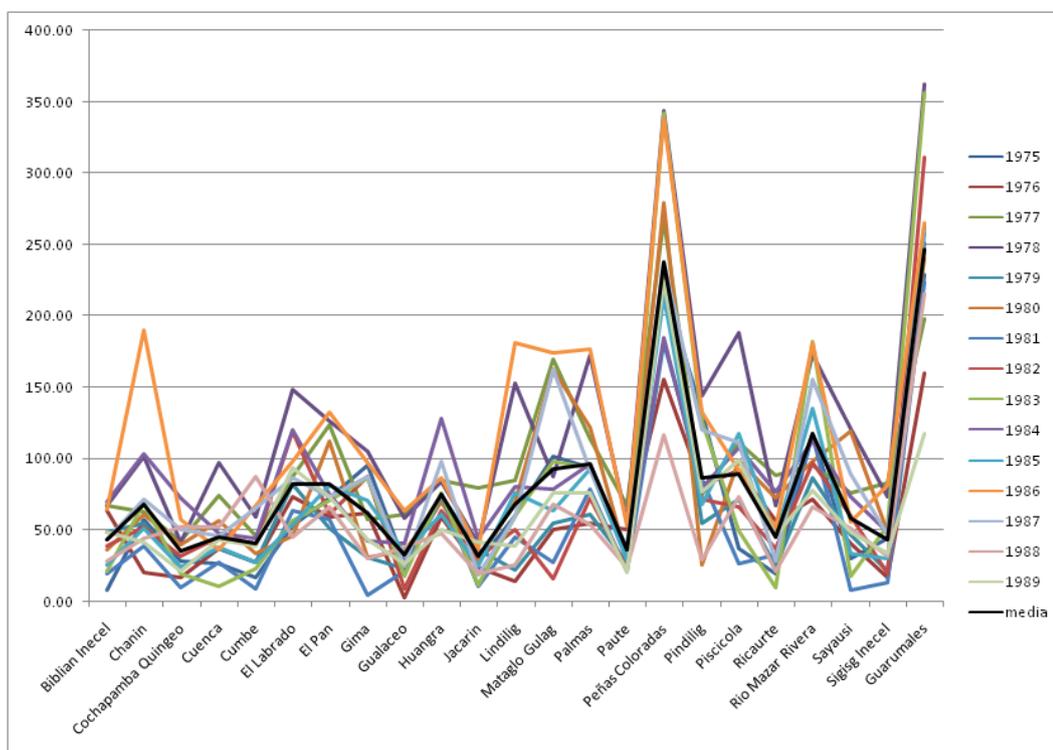


Figura C9: Histograma de precipitaciones del mes de septiembre, periodo 1975 – 1989

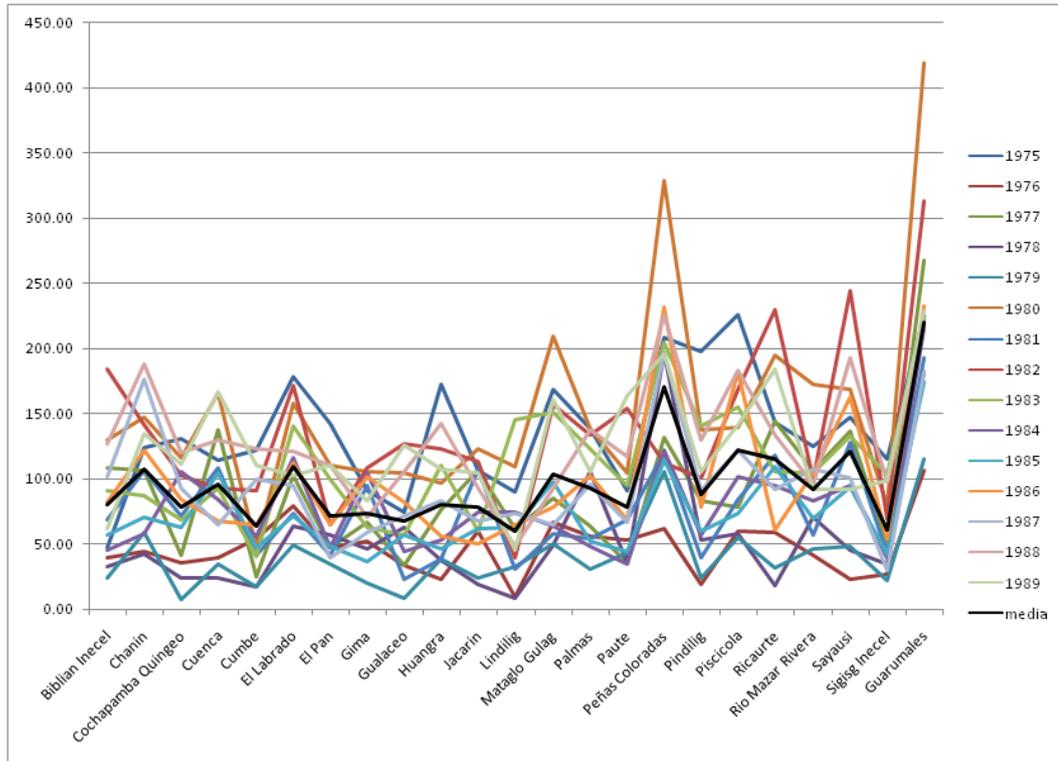


Figura C10: Histograma de precipitaciones del mes de octubre, periodo 1975 – 1989

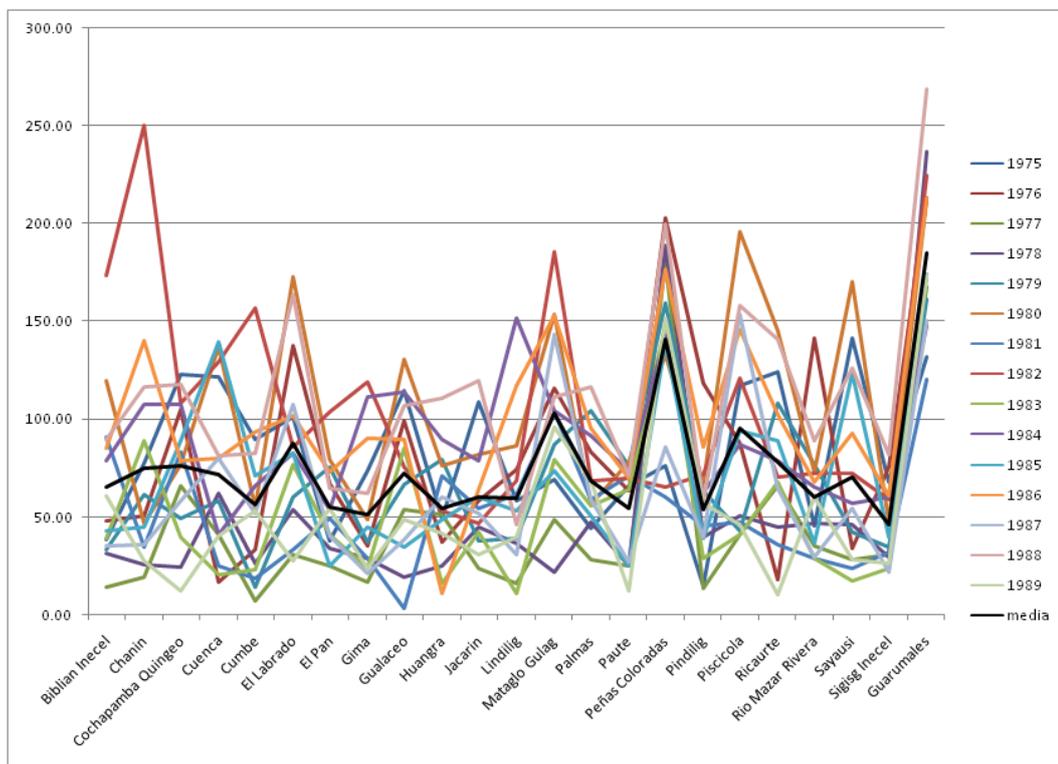


Figura C11: Histograma de precipitaciones del mes de noviembre, periodo 1975 – 1989

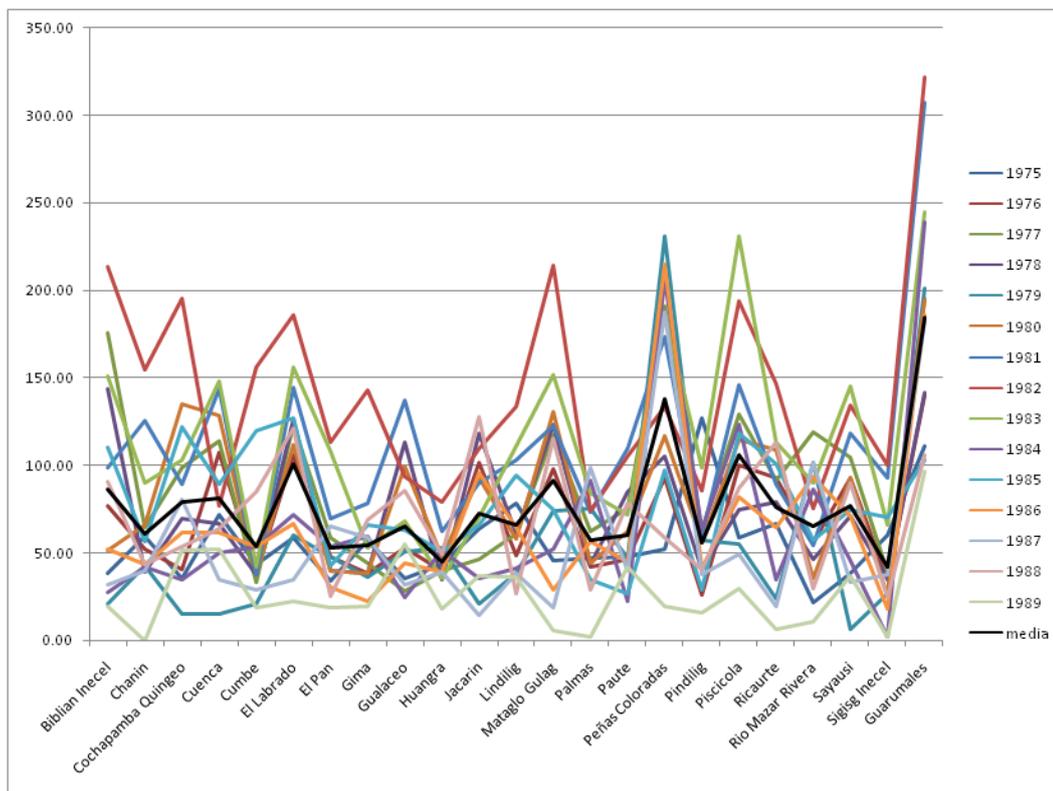


Figura C12: Histograma de precipitaciones del mes de diciembre, periodo 1975 – 1989



## Anexo D

### Valores de precipitación en estaciones obtenidos por los métodos de interpolación en la validación cruzada

Tabla D.1: Valores de precipitación en estaciones obtenidos por los métodos de interpolación en la validación cruzada para el mes de enero

ESTACION		VALOR MEDIDO (mm)	VALOR INTERPOLADO (mm)			
CODIGO	NOMBRE		TH	IDW	KO	CK
M045	Palmas	53.18	49.44	58.54	72.39	72.43
M067	Cuenca	57.92	70.28	67.46	67.71	68.01
M138	Paute	51.88	49.44	55.27	48.42	48.80
M139	Gualaceo	58.34	51.88	58.34	61.19	61.46
M141	El Labrado	97.54	103.87	79.42	81.17	81.58
M197	Jacarin	51.13	70.28	69.70	69.12	69.22
M206	Guarumales	174.20	127.79	120.20	112.77	131.87
M217	Peñas Coloradas	127.79	174.20	144.43	123.68	126.25
M410	Rio Mazar Rivera	64.16	53.22	79.08	68.95	69.39
M414	Chanin	57.63	53.22	55.47	46.55	46.70
M416	El Pan	49.44	53.18	55.81	56.95	57.01
M417	Piscicola	103.87	97.54	81.62	83.34	83.76
M418	Cumbe	37.70	72.27	66.35	67.18	65.75
M426	Ricaurte	70.28	51.13	52.74	54.24	54.81
M427	Sayausi	66.37	57.92	69.93	75.10	75.54
M541	Cochapamba	72.27	37.70	44.47	40.19	40.49
M583	Pindilig	53.22	64.16	65.00	58.95	59.26
M625	BiblianIncel	59.19	51.13	58.70	59.96	60.61
M664	SigisglIncel	38.18	92.02	79.63	82.95	83.17
M668	Mataglo Gulag	92.02	38.18	45.05	43.34	45.28
M669	Gima	50.01	37.70	49.87	48.29	47.60
M671	Huangra	40.31	43.01	86.22	85.48	84.23
M686	Lindilig	43.01	40.31	54.51	51.32	50.79



Tabla D.2: Valores de precipitación en estaciones obtenidos por los métodos de interpolación en la validación cruzada para el mes de febrero

ESTACION		VALOR MEDIDO (mm)	VALOR INTERPOLADO (mm)			
CODIGO	NOMBRE		TH	IDW	KO	CK
M045	Palmas	89.88	75.82	79.79	98.77	97.88
M067	Cuenca	75.69	75.80	76.51	78.45	78.30
M138	Paute	64.01	75.82	75.96	70.54	70.57
M139	Gualaceo	70.84	64.01	77.52	81.47	81.66
M141	El Labrado	112.70	142.53	109.56	112.44	112.57
M197	Jacarin	71.85	75.80	75.91	76.70	76.43
M206	Guarumales	180.39	165.50	159.97	153.42	163.24
M217	Peñas Coloradas	165.50	180.39	160.07	135.96	138.41
M410	Río Mazar Rivera	78.67	72.15	103.69	96.97	98.05
M414	Chanin	74.97	72.15	73.89	64.60	64.80
M416	El Pan	75.82	89.88	81.71	85.33	84.74
M417	Piscicola	142.53	112.70	100.99	103.26	103.21
M418	Cumbe	60.82	87.29	84.12	83.85	83.28
M426	Ricaurte	75.80	71.85	72.63	73.29	73.47
M427	Syausi	89.17	75.69	87.98	99.67	100.23
M541	Cochapamba	87.29	60.82	65.28	63.05	62.72
M583	Pindilig	72.15	78.67	84.14	79.19	79.55
M625	BiblianInecel	79.55	71.85	74.94	77.39	76.72
M664	SigisglInecel	65.24	128.39	112.06	108.08	108.51
M668	Mataglo Gulag	128.39	65.24	67.45	68.20	69.23
M669	Gima	73.23	60.82	69.73	67.72	68.39
M671	Huangra	69.75	57.04	104.58	100.12	99.44
M686	Lindilig	57.04	69.75	78.55	72.17	73.98



Tabla D.3: Valores de precipitación en estaciones obtenidos por los métodos de interpolación en la validación cruzada para el mes de marzo

ESTACION		VALOR MEDIDO (mm)	VALOR INTERPOLADO (mm)			
CODIGO	NOMBRE		TH	IDW	KO	CK
M045	Palmas	106.59	95.41	104.80	106.62	117.17
M067	Cuenca	99.01	105.81	101.50	105.88	101.76
M138	Paute	104.14	95.41	100.08	97.59	94.69
M139	Gualaceo	96.25	104.14	104.45	109.06	106.88
M141	El Labrado	123.46	117.17	106.23	106.50	106.55
M197	Jacarin	80.93	105.81	105.34	104.95	105.58
M206	Guarumales	210.15	175.11	161.83	155.98	153.86
M217	Peñas Coloradas	175.11	210.15	172.18	161.33	158.33
M410	Río Mazar Rivera	94.50	93.67	123.46	112.60	113.61
M414	Chanin	109.85	93.67	99.48	98.01	90.54
M416	El Pan	95.41	106.59	107.44	105.50	110.83
M417	Piscicola	117.17	123.46	112.00	106.18	114.22
M418	Cumbe	62.09	88.18	90.52	90.05	93.37
M426	Ricaurte	105.81	80.93	85.87	88.13	87.96
M427	Syausi	107.96	99.01	102.48	104.52	103.57
M541	Cochapamba	88.18	62.09	78.24	76.47	73.06
M583	Pindilig	93.67	94.50	107.95	102.01	101.18
M625	BiblianInecel	99.52	80.93	100.08	97.42	101.58
M664	SigisglInecel	81.82	146.57	119.97	118.25	122.14
M668	Mataglo Gulag	146.57	81.82	88.07	88.10	86.15
M669	Gima	87.34	62.09	78.00	87.97	75.23
M671	Huangra	84.20	98.65	130.10	122.58	129.13
M686	Lindilig	98.65	84.20	101.40	98.66	86.87



Tabla D.4: Valores de precipitación en estaciones obtenidos por los métodos de interpolación en la validación cruzada para el mes de abril

ESTACION		VALOR MEDIDO (mm)	VALOR INTERPOLADO (mm)			
CODIGO	NOMBRE		TH	IDW	KO	CK
M045	Palmas	160.45	111.95	124.24	142.44	161.71
M067	Cuenca	119.32	125.66	122.22	130.34	127.07
M138	Paute	91.35	111.95	111.59	99.79	98.00
M139	Gualaceo	89.03	91.35	111.12	115.21	110.86
M141	El Labrado	157.26	157.40	137.85	133.47	135.34
M197	Jacarin	86.24	125.66	125.34	120.17	119.51
M206	Guarumales	324.63	284.11	274.29	245.46	257.04
M217	Peñas Coloradas	284.11	324.63	284.74	242.02	237.82
M410	Río Mazar Rivera	118.14	123.70	178.42	167.79	166.62
M414	Chanin	118.81	123.70	115.33	108.40	95.62
M416	El Pan	111.95	160.45	136.07	128.29	137.15
M417	Piscicola	157.40	157.26	147.44	138.24	152.67
M418	Cumbe	88.25	107.80	108.00	109.70	114.51
M426	Ricaurte	125.66	86.24	92.06	99.73	98.60
M427	Syausi	144.72	119.32	125.48	132.08	134.18
M541	Cochapamba	107.80	88.25	95.02	95.76	91.71
M583	Pindilig	123.70	118.14	133.58	128.25	127.39
M625	BiblianInecel	99.33	86.24	108.38	103.36	106.59
M664	SigisglInecel	91.43	179.35	154.52	141.01	144.58
M668	Mataglo Gulag	179.35	91.43	93.16	94.72	94.20
M669	Gima	102.65	88.25	96.30	111.29	95.22
M671	Huangra	120.93	111.64	180.91	162.85	175.43
M686	Lindilig	111.64	120.93	134.90	134.18	114.71



Tabla D.5: Valores de precipitación en estaciones obtenidos por los métodos de interpolación en la validación cruzada para el mes de mayo

ESTACION		VALOR MEDIDO (mm)	VALOR INTERPOLADO (mm)			
CODIGO	NOMBRE		TH	IDW	KO	CK
M045	Palmas	148.49	102.96	120.89	167.17	161.34
M067	Cuenca	82.97	90.80	87.37	90.05	85.47
M138	Paute	58.92	102.96	99.30	80.55	84.47
M139	Gualaceo	65.78	58.92	82.50	75.46	73.32
M141	El Labrado	115.01	114.17	97.51	91.26	93.45
M197	Jacarin	58.93	90.80	90.44	83.54	86.35
M206	Guarumales	361.07	343.91	330.50	301.88	292.39
M217	Peñas Coloradas	343.91	361.07	316.66	270.12	249.98
M410	Río Mazar Rivera	145.51	120.93	193.38	187.12	181.61
M414	Chanin	120.22	120.93	102.14	70.74	71.31
M416	El Pan	102.96	148.49	119.51	107.58	108.37
M417	Piscicola	114.17	115.01	104.69	102.03	102.30
M418	Cumbe	67.96	64.46	69.21	72.39	81.95
M426	Ricaurte	90.80	58.93	63.13	66.78	65.08
M427	Syausi	96.93	82.97	88.79	97.67	103.90
M541	Cochapamba	64.46	67.96	72.17	67.86	68.05
M583	Pindilig	120.93	145.51	147.65	143.11	133.31
M625	BiblianInecel	65.10	58.93	86.99	83.72	85.23
M664	SigisglInecel	73.63	136.87	115.45	104.07	93.90
M668	Mataglo Gulag	136.87	73.63	73.44	77.13	68.12
M669	Gima	79.79	67.96	69.17	76.38	71.96
M671	Huangra	106.11	78.15	195.66	181.08	192.31
M686	Lindilig	78.15	106.11	128.07	98.59	79.26



Tabla D.6: Valores de precipitación en estaciones obtenidos por los métodos de interpolación en la validación cruzada para el mes de junio

ESTACION		VALOR MEDIDO (mm)	VALOR INTERPOLADO (mm)			
CODIGO	NOMBRE		TH	IDW	KO	CK
M045	Palmas	184.81	113.14	130.31	188.68	188.91
M067	Cuenca	35.47	33.65	34.46	32.24	32.99
M138	Paute	47.82	113.14	92.20	63.80	70.54
M139	Gualaceo	40.89	47.82	76.27	74.16	72.58
M141	El Labrado	92.13	102.29	69.54	66.78	68.65
M197	Jacarin	27.18	33.65	33.86	31.68	33.91
M206	Guarumales	351.52	441.12	422.61	385.41	381.22
M217	Peñas Coloradas	441.12	351.52	312.34	276.67	254.95
M410	Río Mazar Rivera	167.42	124.21	223.54	223.13	217.12
M414	Chanin	96.55	124.21	100.87	62.05	62.16
M416	El Pan	113.14	184.81	136.22	129.41	130.15
M417	Piscicola	102.29	92.13	72.68	74.90	73.60
M418	Cumbe	45.41	31.03	35.97	42.62	45.98
M426	Ricaurte	33.65	27.18	28.83	28.23	27.67
M427	Syausi	51.05	35.47	49.43	66.08	71.59
M541	Cochapamba	31.03	45.41	47.13	37.06	36.87
M583	Pindilig	124.21	167.42	163.53	157.07	147.69
M625	BiblianInecel	34.70	27.18	59.91	57.26	60.33
M664	SigisglInecel	61.37	182.56	137.21	112.13	102.70
M668	Mataglo Gulag	182.56	61.37	58.77	67.76	61.80
M669	Gima	48.74	45.41	44.39	54.40	52.75
M671	Huangra	112.76	81.11	223.25	204.46	212.24
M686	Lindilig	81.11	112.76	138.73	84.56	71.27



Tabla D.7: Valores de precipitación en estaciones obtenidos por los métodos de interpolación en la validación cruzada para el mes de julio

ESTACION		VALOR MEDIDO (mm)	VALOR INTERPOLADO (mm)			
CODIGO	NOMBRE		TH	IDW	KO	CK
M045	Palmas	196.39	133.38	138.50	198.00	191.02
M067	Cuenca	33.13	32.70	33.38	33.31	29.95
M138	Paute	46.32	133.38	94.80	65.53	73.09
M139	Gualaceo	33.56	46.32	74.69	69.15	68.73
M141	El Labrado	97.68	110.83	72.85	71.46	72.91
M197	Jacarin	24.45	32.70	32.95	33.05	33.94
M206	Guarumales	319.89	435.98	417.75	375.17	367.88
M217	Peñas Coloradas	435.98	319.89	286.78	260.41	234.47
M410	Río Mazar Rivera	167.41	115.93	216.29	220.43	212.73
M414	Chanin	79.59	115.93	98.99	55.03	60.87
M416	El Pan	133.38	196.39	140.72	122.76	129.48
M417	Piscicola	110.83	97.68	75.34	71.68	73.71
M418	Cumbe	35.45	31.27	37.25	40.15	49.78
M426	Ricaurte	32.70	24.45	26.20	25.89	24.18
M427	Syausi	49.78	33.13	49.47	68.25	74.88
M541	Cochapamba	31.27	35.45	40.46	32.20	30.95
M583	Pindilig	115.93	167.41	161.68	158.97	145.09
M625	BiblianInecel	38.51	24.45	54.64	51.19	49.64
M664	SigisglInecel	64.75	160.33	121.44	101.92	86.52
M668	Mataglo Gulag	160.33	64.75	60.61	68.99	61.61
M669	Gima	55.59	35.45	38.17	57.51	46.58
M671	Huangra	107.46	90.66	220.68	195.52	211.35
M686	Lindilig	90.66	107.46	132.97	88.10	64.31



Tabla D.8: Valores de precipitación en estaciones obtenidos por los métodos de interpolación en la validación cruzada para el mes de agosto

ESTACION		VALOR MEDIDO (mm)	VALOR INTERPOLADO (mm)			
CODIGO	NOMBRE		TH	IDW	KO	CK
M045	Palmas	134.75	98.52	104.38	142.27	136.54
M067	Cuenca	32.09	26.58	27.18	27.39	26.64
M138	Paute	38.76	98.52	70.92	50.15	54.59
M139	Gualaceo	21.91	38.76	57.66	55.48	53.16
M141	El Labrado	70.88	69.33	50.47	49.70	50.09
M197	Jacarin	19.25	26.58	26.91	26.15	27.71
M206	Guarumales	242.77	286.28	275.62	253.49	243.64
M217	Peñas Coloradas	286.28	242.77	219.05	198.98	181.38
M410	Río Mazar Rivera	134.34	96.27	156.65	156.83	153.94
M414	Chanin	65.02	96.27	78.92	54.90	54.29
M416	El Pan	98.52	134.75	99.81	92.66	91.09
M417	Piscicola	69.33	70.88	57.43	59.73	56.83
M418	Cumbe	33.87	26.99	29.64	33.18	37.87
M426	Ricaurte	26.58	19.25	21.60	22.66	21.28
M427	Syausi	43.51	32.09	39.18	50.48	56.31
M541	Cochapamba	26.99	33.87	35.54	29.26	28.01
M583	Pindilig	96.27	134.34	123.44	116.65	110.39
M625	BiblianInecel	33.04	19.25	43.59	39.98	40.51
M664	SigisglInecel	49.99	116.24	88.68	71.58	62.51
M668	Mataglo Gulag	116.24	49.99	45.93	53.86	45.05
M669	Gima	35.22	33.87	34.16	40.71	39.31
M671	Huangra	97.87	64.27	158.24	147.44	153.81
M686	Lindilig	64.27	97.87	112.75	77.02	66.54



Tabla D.9: Valores de precipitación en estaciones obtenidos por los métodos de interpolación en la validación cruzada para el mes de septiembre

ESTACION		VALOR MEDIDO (mm)	VALOR INTERPOLADO (mm)			
CODIGO	NOMBRE		TH	IDW	KO	CK
M045	Palmas	96.67	82.37	90.48	107.92	117.86
M067	Cuenca	45.15	45.30	44.72	47.03	43.23
M138	Paute	36.24	82.37	66.11	56.53	53.49
M139	Gualaceo	32.36	36.24	52.97	52.05	46.21
M141	El Labrado	81.86	89.63	67.24	64.84	67.41
M197	Jacarin	31.75	45.30	45.36	45.25	45.10
M206	Guarumales	246.47	237.89	229.05	198.50	200.58
M217	Peñas Coloradas	237.89	246.47	218.59	190.69	174.31
M410	Río Mazar Rivera	117.81	86.82	135.01	128.76	127.41
M414	Chanin	68.16	86.82	71.45	55.62	50.62
M416	El Pan	82.37	96.67	77.16	66.95	68.12
M417	Piscicola	89.63	81.86	69.75	63.38	68.79
M418	Cumbe	41.00	35.49	41.50	46.65	53.71
M426	Ricaurte	45.30	31.75	34.17	37.35	34.05
M427	Sayausi	58.17	45.15	53.47	63.67	69.27
M541	Cochapamba	35.49	41.00	43.66	43.46	38.30
M583	Pindilig	86.82	117.81	107.05	99.57	93.49
M625	BiblianInecel	43.51	31.75	50.39	49.94	48.94
M664	SigisglInecel	43.00	92.73	75.86	65.54	58.94
M668	Mataglo Gulag	92.73	43.00	42.59	44.00	40.16
M669	Gima	62.18	41.00	40.62	51.10	42.79
M671	Huangra	75.36	68.30	143.86	126.30	145.44
M686	Lindilig	68.30	75.36	91.05	82.79	57.18



Tabla D.10: Valores de precipitación en estaciones obtenidos por los métodos de interpolación en la validación cruzada para el mes de octubre

ESTACION		VALOR MEDIDO (mm)	VALOR INTERPOLADO (mm)			
CODIGO	NOMBRE		TH	IDW	KO	CK
M045	Palmas	92.33	71.13	84.02	103.62	103.88
M067	Cuenca	95.21	114.77	110.32	111.07	111.28
M138	Paute	78.33	71.13	81.66	75.71	77.07
M139	Gualaceo	67.51	78.33	83.38	79.27	79.83
M141	El Labrado	109.08	121.93	111.46	107.94	108.69
M197	Jacarin	78.03	114.77	113.94	106.55	106.57
M206	Guarumales	219.88	170.39	165.24	155.07	164.80
M217	Peñas Coloradas	170.39	219.88	194.19	164.21	165.15
M410	Río Mazar Rivera	91.75	87.67	116.45	108.19	108.50
M414	Chanin	107.21	87.67	84.84	74.38	74.58
M416	El Pan	71.13	92.33	88.83	86.69	86.86
M417	Piscicola	121.93	109.08	110.27	111.56	112.26
M418	Cumbe	63.86	78.18	78.98	84.23	83.53
M426	Ricaurte	114.77	78.03	81.05	84.27	84.57
M427	Sayausi	120.68	95.21	100.52	103.97	104.05
M541	Cochapamba	78.18	63.86	70.07	67.94	68.47
M583	Pindilig	87.67	91.75	98.86	95.82	96.36
M625	BiblianInecel	80.01	78.03	92.70	92.09	93.05
M664	SigisglInecel	60.39	103.46	94.83	91.04	90.99
M668	Mataglo Gulag	103.46	60.39	64.04	62.11	62.93
M669	Gima	73.64	63.86	69.74	69.97	68.22
M671	Huangra	80.32	59.78	116.15	112.65	112.01
M686	Lindilig	59.78	80.32	90.20	82.92	81.79



Tabla D.11: Valores de precipitación en estaciones obtenidos por los métodos de interpolación en la validación cruzada para el mes de noviembre

ESTACION		VALOR MEDIDO (mm)	VALOR INTERPOLADO (mm)			
CODIGO	NOMBRE		TH	IDW	KO	CK
M045	Palmas	68.43	54.95	63.47	67.40	78.32
M067	Cuenca	71.52	77.69	74.63	75.67	75.23
M138	Paute	54.40	54.95	65.44	65.05	63.16
M139	Gualaceo	71.95	54.40	64.86	67.26	68.25
M141	El Labrado	87.78	95.27	80.10	78.99	81.11
M197	Jacarin	60.19	77.69	77.25	75.10	75.17
M206	Guarumales	184.72	140.61	132.36	120.77	146.64
M217	Peñas Coloradas	140.61	184.72	152.74	132.40	131.90
M410	Río Mazar Rivera	59.75	53.64	86.32	76.06	77.36
M414	Chanin	75.05	53.64	58.99	55.46	48.97
M416	El Pan	54.95	68.43	66.26	64.26	69.01
M417	Piscicola	95.27	87.78	79.38	76.74	80.30
M418	Cumbe	55.99	75.82	70.09	66.02	67.03
M426	Ricaurte	77.69	60.19	62.60	65.41	65.53
M427	Syausi	70.50	71.52	76.15	77.50	80.59
M541	Cochapamba	75.82	55.99	58.58	57.19	56.44
M583	Pindilig	53.64	59.75	70.55	65.86	65.45
M625	BiblianInecel	65.29	60.19	67.62	66.11	69.76
M664	SigisglInecel	45.99	102.99	89.47	86.17	89.97
M668	Mataglo Gulag	102.99	45.99	53.66	57.21	54.67
M669	Gima	50.87	55.99	62.58	67.72	57.62
M671	Huangra	54.60	59.20	94.65	87.62	92.59
M686	Lindilig	59.20	54.60	66.49	68.90	55.64



Tabla D.12: Valores de precipitación en estaciones obtenidos por los métodos de interpolación en la validación cruzada para el mes de diciembre

ESTACION		VALOR MEDIDO (mm)	VALOR INTERPOLADO (mm)			
CODIGO	NOMBRE		TH	IDW	KO	CK
M045	Palmas	57.25	52.95	62.84	64.63	66.30
M067	Cuenca	81.51	76.73	76.29	81.10	76.25
M138	Paute	60.27	52.95	61.91	55.62	61.89
M139	Gualaceo	65.56	60.27	66.26	73.25	70.22
M141	El Labrado	101.07	106.13	89.32	91.40	91.25
M197	Jacarin	72.55	76.73	77.04	76.06	78.90
M206	Guarumales	184.62	137.92	129.74	149.07	153.38
M217	Peñas Coloradas	137.92	184.62	152.92	145.52	137.46
M410	Río Mazar Rivera	65.24	56.20	85.12	62.58	77.42
M414	Chanin	61.24	56.20	63.52	66.69	64.23
M416	El Pan	52.95	57.25	61.41	61.29	59.68
M417	Piscicola	106.13	101.07	89.65	87.36	85.57
M418	Cumbe	53.82	78.95	73.47	72.85	67.14
M426	Ricaurte	76.73	72.55	74.39	75.79	77.22
M427	Syausi	76.96	81.51	84.80	89.00	88.57
M541	Cochapamba	78.95	53.82	58.21	56.14	57.73
M583	Pindilig	56.20	65.24	68.41	57.38	60.18
M625	BiblianInecel	86.74	72.55	69.22	68.75	70.83
M664	SigisglInecel	42.26	91.52	82.83	84.57	81.68
M668	Mataglo Gulag	91.52	42.26	50.43	49.20	56.84
M669	Gima	54.82	53.82	62.08	58.81	63.10
M671	Huangra	45.42	66.27	97.36	92.11	91.34
M686	Lindilig	66.27	45.42	59.89	62.32	67.98



Tabla D.13: Valores de precipitación media anual en estaciones obtenidos por los métodos de interpolación en la validación cruzada

ESTACION		VALOR MEDIDO (mm)	VALOR INTERPOLADO (mm)			
CODIGO	NOMBRE		TH	IDW	KO	CK
M045	Palmas	1389.20	1042.00	1152.50	1538.56	1525.90
M067	Cuenca	829.00	875.80	858.73	861.69	857.72
M138	Paute	732.40	1042.00	973.27	842.08	850.28
M139	Gualaceo	714.00	732.40	909.58	907.43	897.19
M141	El Labrado	1246.50	1330.50	1078.57	1074.59	1074.10
M197	Jacarin	662.50	875.80	874.64	848.71	853.81
M206	Guarumales	3000.30	2946.60	2836.82	2629.58	2587.26
M217	Peñas Coloradas	2946.60	3000.30	2651.38	2267.04	2201.51
M410	Rio Mazar Rivera	1304.70	1084.40	1693.39	1615.49	1603.29
M414	Chanin	1034.30	1084.40	1000.93	786.03	782.49
M416	El Pan	1042.00	1389.20	1166.77	1148.24	1139.00
M417	Piscicola	1330.50	1246.50	1108.62	1130.29	1117.53
M418	Cumbe	646.20	777.70	785.78	821.70	841.08
M426	Ricaurte	875.80	662.50	692.44	720.54	715.28
M427	Sayausi	975.80	829.00	927.30	1029.82	1051.63
M541	Cochapamba	777.70	646.20	699.59	655.67	652.04
M583	Pindilig	1084.40	1304.70	1325.18	1251.30	1228.15
M625	BiblianInecel	784.50	662.50	865.52	865.70	867.23
M664	SigisglInecel	718.10	1533.00	1287.82	1176.76	1142.44
M668	Mataglo Gulag	1533.00	718.10	737.00	783.07	752.08
M669	Gima	774.10	646.20	707.49	725.72	721.22
M671	Huangra	995.10	878.10	1749.28	1676.02	1698.93
M686	Lindilig	878.10	995.10	1171.60	910.16	867.93