



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS AGROPECUARIAS

**GENERACIÓN DE ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA LA
REGION SIERRA NORTE DEL ECUADOR BASADO EN MODELOS
MATEMÁTICOS**

**Trabajo de Titulación presentado en conformidad con los requisitos
establecidos para optar por el título de Ingeniero Ambiental en Prevención y
Remediación**

Profesor Guía

Ing. Mónica Delgado

Autor

Jorge Andrés Izquierdo Paredes

Año

2014

DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA

“Declaro haber dirigido este trabajo a través de reuniones periódicas con el estudiante, orientando sus conocimientos para un adecuado desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajo de Titulación”.

.....

Mónica Delgado
MBA en Administración Ambiental, Msc eg.
C.I. 1713582557

DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

“Declaro que este trabajo es original, de mi autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigente”.

.....

Jorge Andrés Izquierdo Paredes
C.I. 171350259-7

RESUMEN

Mediante el estudio realizado se presenta la oportunidad de encaminar un acercamiento a variaciones producidas en el Ecuador mediante el análisis de factores climáticos cuyos registros se presentan en el almacenamiento de información en estaciones meteorológicas cuyos principales elementos de análisis son la precipitación y la temperatura.

Se presenta la generación de escenarios de cambio climático mediante análisis geo estadístico en sistemas de información geográfica (SIG) utilizando un modelo matemático acoplado a la zona norte de la región sierra del Ecuador con los valores correspondientes a los registros históricos de precipitación y temperatura.

Se establece la red de estaciones meteorológicas para la zona de estudio realizando un escrutinio de la información histórica disponible, permitiendo determinar aquellas que presentan datos continuos y representativos que admiten un análisis adecuado de las variaciones en temperatura y en los niveles de precipitación existentes a lo largo de las últimas 3 décadas.

Se somete la serie de datos establecida al análisis de estacionariedad mediante el modelo matemático desarrollado por Emanuele Cordano en lenguaje de programación R, para proceder a la utilización de métodos de interpolación con los datos validados.

Con la información obtenida utilizando la metodología de interpolación kriging, para el cálculo de variogramas y mapas predictivos destinados al desarrollo de tendencias que reflejen las variaciones observadas en la zona de estudio, se encuentra que las tendencias hasta el 2030 se mantienen en los mismo centros focales, donde se observa la continua reducción de precipitaciones hacia el norte y este del cantón Espejo, Quito y San Miguel de los Bancos, y el incremento de precipitaciones en la zona noroeste se reduce significativamente, en tanto que la temperatura aumenta hacia el norte en un

área de aproximadamente 40km² entre Tulcán y San Pedro de Huaca, se produce la aparición de un pequeño centro con mayor temperatura en el área de Ibarra de 3km² aproximadamente. Se evidencia el avance de frentes fríos con un promedio de 4km radiales, produciendo un descenso en las temperaturas en Quito y San Miguel de los bancos hacia Pedro Vicente Maldonado y desde Quito hacia Cayambe.

Para la predicción al 2050, la zona focal de aumento de temperatura en Ibarra se incrementa hacia el sureste con un área aproximada de avance de 180km², donde Pimampiro es el cantón con mayor incidencia de cambio.

ABSTRACT

By the development of study there is a chance to seize an approach to the weather variations in Ecuador by the analysis of climatic factors which records are registered in weather stations whose main elements of analysis are precipitation and temperature.

Generating climate change scenarios is achieved by geo statistical analysis in geographic information systems (GIS) using a mathematical model coupled to the northern Sierra region of Ecuador using the historical values from records of precipitation and temperature.

The weather stations network from the study area conducting is analyzed in order to determine the available historical data set, allowing making the selection of those station that present continuous and representative data that allows a proper analysis of variations in temperature and precipitation levels along the last 3 decades.

The data determined in the weather network is analyzed in the mathematical model created by Emanuele Cordano in R, used to determine Stationarity in the data series, in order to use this information with the interpolation methods.

With the information obtained with the Kriging method for interpolating data, predictive maps for the developing trends that reflect the variations observed in the study area are elaborated, showing that the trends until 2030 are kept in the same focal points, where there occurs a continuous reduction of rainfall to the north and east of Espejo, Quito and San Miguel de los Bancos, and the increase in precipitation in the northwest is significantly reduced. While the temperature increases to the north in an area close to 40km² between Tulcán and San Pedro de Huaca, the appearance of a small area with higher temperature occurs in Ibarra distributed along 3km². There is a radial advance of cold fronts averaging 4km, producing a decrease in temperatures from Quito

and San Miguel de los Bancos to Pedro Vicente Maldonado and from Quito to Cayambe.

To the year 2050, the focal zone of temperature increase in Ibarra expands to the southeast region with an area of approximately 180km², where Pimampiro shows the highest incidence of change.

INDICE

| | |
|---|--------------|
| Introducción..... | |
| ...1 | |
| 1. MARCO TEÓRICO | 4 |
| 1.1. CLIMA..... | 5 |
| 1.2. CLIMAS EN EL ECUADOR | 6 |
| 1.3. CAMBIO CLIMÁTICO..... | 7 |
| 1.4. ANÁLISIS DE FACTORES PROPUESTOS PARA GENERACIÓN DE ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO..... | 10 |
| 1.5. BALANCE HÍDRICO..... | 11 |
| 1.6. MODELOS Y ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO..... | 13 |
| 1.7. MÉTODOS DE INTERPOLACIÓN..... | 16 |
| 1.8. MODELOS CLIMÁTICOS APLICABLES EN EL ECUADOR | 19 |
| 1.8.1. Selección del modelo para la zona de estudio..... | 20 |
| 2. ANÁLISIS DE RED DE DATOS | 23 |
| 2.1. ANÁLISIS Y AJUSTE DE SERIES METEOROLÓGICAS | 23 |
| 2.2. ANÁLISIS DE RED HIDRO-METEOROLÓGICA EXISTENTE | 23 |
| 2.3. RECOPIACIÓN DE CARTOGRAFÍA BASE Y TEMÁTICA EXISTENTE | 31 |
| 2.4. RECOPIACIÓN SRTM 30 O 90 | 33 |
| 2.5. MEDIAS MULTI-MODELO DE PRECIPITACIÓN MEDIA..... | 36 |
| 2.6. MEDIAS MULTI-MODELO DE TEMPERATURA MEDIA..... | 40 |
| 3. MODELOS Y GRÁFICOS | 44 |
| 3.1. REGIONALIZACIÓN DE ZONAS CLIMÁTICAS EN EL ECUADOR | 44 |
| 3.1.1. Metodología MAE..... | 44 |
| 3.1.2. Metodología Pourrut..... | 46 |
| 3.2. REGIONALIZACIÓN EN LA ZONA DE ESTUDIO..... | 50 |
| 3.3. DETERMINACIÓN DEL MODELO APLICABLE PARA LA ZONA DE ESTUDIO..... | 57 |
| 3.3.1. Aplicación del modelo matemático..... | 60 |
| 3.3.2. Aplicación del método Kriging..... | 62 |
| 5. ESCENARIOS..... | 65 |
| 5.1. ESCENARIOS AGRUPADOS EN EL TIEMPO REPRESENTADOS MEDIANTE MAPAS TEMÁTICOS HISTÓRICOS EN SIG | 65 |
| 5.2. GENERACIÓN DE LOS MAPAS TEMÁTICOS PREDICTIVOS EN SIG BASADO EN EL ANÁLISIS DE LAS TENDENCIAS | 78 |
| 5.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS PREDICTIVOS | 81 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 5.3.1. | Precipitación..... | 81 |
| 5.3.2. | Temperatura..... | 81 |
| 6. | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 83 |
| 6.1. | CONCLUSIONES..... | 83 |
| 6.2. | RECOMENDACIONES..... | 86 |
| | REFERENCIAS..... | 87 |

Introducción

Antecedentes

Debido a las actividades de origen antropogénico, que generan gases de efecto invernadero, se han empezado a notar los efectos del cambio climático, contribuyendo a la alteración de un proceso natural dentro de nuestro planeta, conocido como el efecto invernadero (BBC, 2013).

Este fenómeno es producto de las diversas actividades humanas que conllevan a la generación de gases de efecto invernadero, cuya influencia se observa de manera directa con los varios informes presentados por el IPCC, que muestran el incremento exponencial de dichos gases desde años posteriores a la revolución industrial. De manera concreta, se puede afirmar que las emisiones mundiales de GEI por efecto de actividades humanas han aumentado, desde la era preindustrial, en un 70% entre el año 1970 y 2004 (IPCC, 2007, p 5).

Se observa que en la actualidad se plantean una serie de iniciativas cuyo enfoque se direcciona a temas relacionados con el cambio climático, como se observa en el caso del webinar: "Construcción de Escenarios de Cambio Climático en los Andes", efectuado el día 19 de abril de 2013, donde se trató la temática climática para la Región Andina. Este webinar permitió compartir experiencias, investigaciones y metodologías de trabajo entre las instituciones del IDEAM, INAMHI y SENAMHI (Valencia, 2013).

Siendo el cambio climático un fenómeno que presenta afectaciones a nivel global, es importante resaltar que los diversos efectos que pueden suscitarse en el Ecuador. Los mismos no solo afectan a los ecosistemas mediante procesos de desertificación y el aumento de los niveles del mar, sino que también se producen afectaciones a las diversas colectividades distribuidas a lo largo de la superficie terrestre, produciendo de manera evidente variaciones

sobre los usos de suelo, reducción líneas costeras por efecto del deshielo de los polos, entre otros (IPCC, 2007, p.12).

Es por esta razón que se considera de vital importancia el poder generar diversos escenarios desarrollados mediante el análisis de las variaciones de algunos factores que influyen dentro de los procesos de cambio climático para poder predecir los posibles escenarios que se generarían en una zona específica. De esta manera, se podría perfilar el posible clima a futuro con las condiciones ambientales encontradas.

Es de suma importancia enfocar esta problemática dentro del Ecuador, generando un acercamiento desde el punto de vista de escenarios de cambio climático que permita analizar las variaciones existentes en el transcurso de las últimas tres décadas hasta actualidad. Esto permitirá conocer las posibles tendencias que se generan basadas en análisis geo- estadísticos.

Objetivos

Objetivo general

Generar escenarios de cambio climático mediante la utilización de un modelo matemático acoplado a la zona norte de la región sierra del Ecuador con la utilización de los valores correspondientes a los registros históricos de precipitación y temperatura para el Ecuador.

Objetivos específicos

- Determinar los principales factores considerados dentro de la generación de escenarios de cambio climático.
- Determinar los regímenes de precipitación para el análisis de los escenarios a ser generados.
- Generar gráficos detallados de las variaciones de precipitación y temperatura en el tiempo

- Elaborar los escenarios de cambio climático presentados en Sistemas de Información Geográfica (SIG) para la comprensión de la evolución histórica de los cambios a nivel nacional.

Alcance

El alcance del presente estudio consiste en la elaboración de escenarios de cambio climático para la zona norte de la región sierra del Ecuador, basada en el análisis del registro histórico de los valores de precipitación y temperatura registrados por las estaciones meteorológicas del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), expresado con la ayuda de los sistemas de información geográfica.

Metodología

La metodología utilizada en este trabajo de investigación corresponde a un proceso de análisis de los factores que permiten trabajar con las variaciones de cambio climático producido para el territorio nacional, entre los cuales se encuentran primordialmente los registros históricos de precipitación y temperatura de las diversas estaciones meteorológicas encontradas dentro de la región que se desea analizar.

Una vez analizados dichos factores se determina un modelo matemático que permite trabajar con estas variables para proceder a generar los diversos cambios producidos durante un periodo de tiempo determinado.

Por último, se generan los escenarios de cambio con el análisis de la información, mediante mapas temáticos generados a través de Sistemas de Información Geográfica, para facilitar la comprensión de las variaciones producidas mediante el modelo generado.

1. Marco Teórico

El eje fundamental de desarrollo del presente estudio es el cambio climático. Para desarrollar los futuros escenarios que plantea este estudio, se debe conocer acerca del cambio climático como concepto, para poder comprender posteriormente las afectaciones que dicho fenómeno presenta sobre las diversas zonas del Ecuador, y específicamente en el caso del presente estudio, sobre la región Sierra-Norte.

En primera instancia se analiza el cambio climático como un proceso visible a nivel global, ya que sus efectos se evidencian de manera directa con: el aumento de los promedios mundiales de la temperatura del aire y del océano, el deshielo generalizado de nieves y hielos, y el aumento del promedio mundial del nivel del mar (IPCC, 2007, p.2).

El cambio climático es la alteración de un proceso que existe en el planeta de forma natural denominado efecto invernadero. Este ocurre al generarse retención de calor en la superficie terrestre. La alteración ocurre al generarse una sobreproducción de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en la atmósfera, mediante actividades de origen antropogénico, lo cual conlleva a una excesiva retención de calor y consecuentemente a un aumento en la temperatura (Rojas, 2013, p. 53).

Es debido a la observación realizada a estos acontecimientos que se han creado organismos como el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC) que se estableció en 1988, cuya finalidad es proporcionar una serie de datos e información científica con diversos modelos socioeconómicos y técnicos sobre los riesgos generados por las actividades humanas; así como las consecuencias que dichas actividades presentan en términos ambientales y socioeconómicos; y por último presentando diversas alternativas y modelos de adaptación y mitigación para estos efectos adversos (IPCC, 2013).

Uno de los principales enfoques sobre los cuales trabaja el IPCC, es la generación de modelos y de escenarios de cambio climático, para conocer

tendencias respecto a las actividades humanas y sus posibles consecuencias en términos de variaciones de temperatura, precipitaciones y todos aquellos aspectos que presentan afectaciones sociales y económicas debidos a dichos cambios (IPCC, 2013).

Los temas referentes a los modelos hidrológicos para evaluar el impacto del cambio climático conllevan a la utilización de variables meteorológicas simuladas por los Modelos Climáticos Globales (MCG). Debido a las variaciones de las escalas, los MCG no se pueden utilizar directamente para estudios de impacto hidrológicos sino más bien necesitan ser reducidos en escala (Teutschbein, Wetterhall y Seibert, 2011).

1.1. Clima

Al intentar realizar el primer acercamiento al presente estudio, es importante analizar el eje sobre el cual se desenvuelven las diversas ideas planteadas, y encontramos que es necesario conocer al clima.

Para ello, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura, FAO (2013), presenta una descripción bastante detallada de aquello que corresponde al término que conocemos como clima, donde se menciona:

“El clima de determinada zona es el resultado de la sucesión de las diversas condiciones del tiempo a lo largo del año. En las zonas templadas, las características atmosféricas, en una lenta transición, varían del verano al otoño, del invierno a la primavera, para recomenzar el ciclo. En los trópicos, se alternan períodos secos con épocas de lluvias intensas”. (FAO, 2013)

De esta manera, se puede advertir que el clima corresponde a condiciones del tiempo en un determinado lugar a lo largo de un periodo de tiempo. Lo cual conlleva a la definición de aquello que corresponde al “tiempo”.

Para ello, se encuentra pertinente la descripción presentada por Pourrut, realizada mediante estudios en la década de los ochenta y validada por el Instituto Nacional de Hidrología y Meteorología, donde se menciona que:

“Los elementos que caracterizan al tiempo o al clima son variables físicas mensurables como resultan ser la insolación, la nubosidad, las precipitaciones, la temperatura del ambiente, evaporación, humedad del aire y presión atmosférica. Los cuales presentan variaciones debido a la influencia de factores (astronómicos, geográficos, meteorológicos)” (Pourrut, 1983, p. 11)

1.2. Climas en el Ecuador

Los temas referentes a la caracterización de climas en el Ecuador son limitados. Como principal representante de esta temática encontramos a Pierre Pourrut, quien se ha desenvuelto en temas de índole climática con direccionamiento al territorio nacional desde los años 70 (Pourrut, 1983).

En uno de sus trabajos, Pourrut describe que el clima en el Ecuador está condicionado por dos factores principales: la circulación atmosférica general y las masas de aire locales que resultan del relieve (de origen oceánico que se desplazan al continente, origen occidental, de aire templado sobre los Andes, y de aire frío en las cumbres de los volcanes) (Pourrut y Gómez, 1998, p. 454). De igual manera, se describe que intervienen las corrientes oceánicas principalmente en la zona del litoral.

Basado en este análisis podemos determinar que uno de los factores determinantes en las variaciones climáticas dentro de las diversas zonas geográficas del territorio nacional, corresponde a las masas de aire con diversos niveles de temperatura que circulan entre las regiones del Ecuador.

Realizando un primer acercamiento que permite determinar la distribución de lluvias, basado en las condiciones geográficas, se consideran las regiones existentes en el Ecuador (Región Litoral, Andes y Amazonía) donde cada una de ellas presenta características y condiciones particulares, mismas que se estructuran a partir de la existencia de la Cordillera de los Andes (Melo, Herrera, y Galeas, 2012).

A modo de ratificación del principio mencionado, se observa que en otro de sus documentos desarrollados para climas en el Ecuador, se describe de manera clara las diversas clases de climas en relación a las regiones geográficas. En este se describe nueve diferentes tipos de climas distribuidos a lo largo del Ecuador (Pourrut, 1995, pp. 21-23)

Región Costanera

El clima tropical megatérmico árido a semiárido

El clima tropical megatérmico seco a semi-húmedo

El clima tropical megatérmico húmedo

Región Andina

Clima tropical megatérmico muy húmedo

Clima ecuatorial mesotérmico semi-húmedo húmedo

Clima ecuatorial mesotérmico seco

Clima ecuatorial frío de alta montaña.

Región Amazónica

Clima uniforme megatérmico muy húmedo

1.3. Cambio climático

Para comprender los principales aspectos que se consideran dentro del proceso conocido como cambio climático, se analizan dos conceptos básicos:

uno proveniente del trabajo desarrollado por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2007), y uno proveniente del trabajo desarrollado en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC 2013).

Dentro de las ideas que resultan desarrolladas por parte de los miembros del IPCC (2007, p.30) se determina que:

“El término cambio climático denota un cambio en el estado del clima identificable (por ejemplo, mediante análisis estadísticos) a raíz de un cambio en el valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, y que persiste durante un período prolongado, generalmente cifrado en decenios o en períodos más largos. Denota todo cambio del clima a lo largo del tiempo, tanto si es debido a la variabilidad natural como si es consecuencia de la actividad humana” (IPCC, 2007, p. 30).

Difiere de la definición presentada por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (1992, p.3) en su enfoque planteado como un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial, y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables (CMNUCC, 1992, p. 3).

Mediante la comparación de los dos conceptos, se encuentra que existe una limitación planteada en el segundo caso, el mismo que enmarca las atribuciones de variaciones climáticas únicamente a aquellas provenientes de las actividades humanas cuyo resultado altera la composición de la atmósfera.

De esta manera global, se denota que existe una evolución respecto al enfoque del concepto, al ver de manera más amplia aquellos factores que inciden dentro de las variaciones climáticas y no limitándose a considerar a las actividades humanas como único agente de acción.

En cuanto a las similitudes de los dos conceptos, se observa que en ambos casos, se hace referencia a una variación en “propiedades” o “composición” de la atmósfera, independiente de su origen, mientras sean medidas en un periodo de tiempo determinado que pueda ser comparable; siendo el eje fundamental las variaciones atmosféricas determinadas en una serie de tiempo específico.

De manera rápida, entre los principales efectos o consecuencias del proceso de cambio climático, se encuentran: procesos de sequías, aumento de la temperatura media a nivel global, aumento de la severidad de fenómenos climáticos (inundaciones y sequías), variación de la temperatura con mayores índices de velocidad de cambio, aumento de niveles del mar, y pérdida de diversidad biológica. Todos estos fenómenos con sus debidas repercusiones sociales y económicas (Rojas A., 2013).

Dentro de algunos de los estudios realizados en el Ecuador, se observa que con el pasar de los años, se ha generado interés por temas relacionados al Cambio Climático, como por ejemplo, el trabajo realizado por Gonzalo Ontaneda (INAMHI, 2013) quien en uno de sus estudios, presenta un análisis de las variaciones existentes en términos de temperatura y precipitaciones, realizando comparaciones de los valores obtenidos en diversas estaciones meteorológicas, donde se presentan casos concretos que demuestran la ocurrencia de estas variaciones en nuestro país (Ontaneda, 2007, p.88).

Siendo evidente que existe una creciente preocupación a nivel nacional relacionada a las posibles afectaciones que pudiesen ocurrir debido al cambio climático, se generó un documento denominado: Estrategia Nacional de Cambio Climático, donde se presentan antecedentes referentes al cambio climático, donde lo más importante es el planteo del direccionamiento, que existe para realizar una adecuada gestión del cambio climático en el país describiendo el proceso político y normativo que implica dicha gestión (MAE, 2012).

1.4. Análisis de factores propuestos para generación de escenarios de cambio climático

Dentro de este estudio, la principal tarea a considerar dentro del modelamiento matemático con enfoque a la generación de teorías climáticas, se encuentra estrechamente relacionado con las fuerzas externas que van a definir el método constructivo su influencia, ya que el método de estudio realizado se basa en la utilización de un sistema de simulación matemático-numérico (Dymnikov, Lykosov, y Volodin, 2006, p. 568).

Bajo este concepto, es necesario desarrollar el presente estudio con la menor afectación de factores externos que puedan influenciar de manera negativa la obtención de información deseada mediante los modelos matemáticos.

De tal manera, podemos encontrar que las proyecciones realizadas son más confiables cuando se trabaja sobre la temperatura, en lugar de precipitaciones u otros parámetros climáticos con mayor grado de variabilidad, de igual manera al trabajar con las variaciones promedio en lugar de los cambios producidos en eventos extremos, y por último al trabajar en grandes regiones en lugar de regiones pequeñas (Füssel y Mastrandrea, 2009, p. 153).

Bajo el mismo direccionamiento, para reducir de manera considerable el grado de incertidumbre en cuanto a los posibles escenarios a ser generados dentro del estudio, uno de los principales factores para el trabajo dentro del desarrollo del presente estudio corresponde a los registros de temperatura existentes en la base de datos del INAMHI.

Se considera la base de datos proveniente del INAMHI que cuenta con series donde se ha realizado el análisis de fiabilidad de los datos hidrometeorológicos y de temperatura, así como registros de precipitación provenientes de las diversas estaciones presentes en la zona de estudio (región Sierra-Norte del

Ecuador), las cuales serán descritas y definidas en el Capítulo 2.1 del presente trabajo.

Asimismo, se cuenta con una serie de valores establecidos a lo largo del tiempo, que permite un acercamiento al comportamiento del clima en la región definida como zona de estudio, al acceder a la incorporación de las variaciones presentadas a los modelos matemáticos existentes, acercándose de manera realista a los posibles escenarios a presentarse en un futuro.

Por disponibilidad de datos provenientes de bases de datos del INAMHI, la selección de las variables: precipitación y temperatura, se justifica el encontrar que la utilización tanto de datos provenientes de la precipitación, como de la temperatura son aplicables para determinar escenarios de cambio climático, como se ha realizado en otros estudios (Muñoz, 2010, p. 15).

1.5. Balance Hídrico

Uno de los principales factores a ser analizados dentro del presente estudio corresponde a los valores de precipitación, cuyas variaciones se ven directamente evidenciadas en la disponibilidad de agua en una zona determinada.

Por esta razón, para poder determinar la influencia del cambio climático sobre el volumen de precipitación en la zona de estudio, y consecuentemente sobre la disponibilidad de agua en la misma, se ha decidido trabajar con un sencillo análisis que se enmarca dentro del término: balance hídrico.

De manera global, bajo la definición de Mijares (1992) podemos definir al balance hídrico como un análisis de la disponibilidad de agua en la cuenca, mismo que se encuentra directamente relacionado con todos los ingresos de agua que recibe la cuenca, y a su vez de los egresos existentes.

Siendo la ecuación de Mijares la base de desarrollo del concepto de balance hídrico para una zona determinada, podemos encontrar que existen versiones simplificadas de la misma, permitiendo realizar una determinación más fácil de las existencias de agua en una cuenca.

$$I - O = \Delta S / \Delta t \quad (\text{Ecuación 1})$$

Fórmula Simplificada de Balance Hídrico

Tomado de Monsalve, 1999, p. 25

Para conocer de mejor manera la ecuación presentada, se describen cada uno de los factores presentes en la siguiente tabla:

Tabla 1 Elementos de la fórmula de Balance Hídrico

| Entradas (I) | Salidas (O) | Cambio de almacenamiento (ΔS) |
|--|--|---|
| Precipitación | Evaporación transpiración | Almacenamiento de aguas subterráneas |
| Importaciones de agua | Escoorrentía superficial hacia otras hoyas | Almacenamiento por cambio de humedad del suelo |
| Escoorrentía superficial desde otras hoyas | Exportaciones de agua | Almacenamiento superficial de embalses en canales y en la propia escoorrentía superficial |
| Aguas subterráneas de otras hoyas | Aguas subterráneas hacia otras hoyas | |
| | Infiltración | |

Adaptado de Monsalve 1999.

1.6. Modelos y escenarios de Cambio Climático

Tratando de definir el concepto de escenario, podemos decir que un escenario corresponde a una descripción de una situación futura, basada en principios científicos. Para construir un escenario se hacen supuestos sobre los factores que pueden originar una situación, así como sobre las relaciones que se generan entre ellos.

Tomando como base a los escenarios de emisiones se construyen, a su vez, escenarios sobre las concentraciones resultantes de GEI y aerosoles. Estos datos se introducen en un modelo climático para obtener, finalmente, proyecciones sobre el clima futuro (MAE, 2009).

Como base fundamental para desarrollar escenarios de cambio climático, se presentan tres principales métodos de acercamiento para su desarrollo. Entre estos modelos se presentan los modelos climáticos globales, los modelos climáticos regionales y los modelos estadísticos de regionalización. Dichos métodos presentan variaciones que deben ser consideradas para determinar la aplicabilidad de los modelos dependiendo del estudio que se desea realizar (Mearns, Giorgi, Whetton, y Pabon, 2003).

Al generar el primer acercamiento y analizar los principales modelos, se puede observar ciertos detalles que nos permiten conocer más a fondo las ventajas y desventajas prácticas de cada uno de ellos. Para su análisis, se toma como base los tres principales modelos descritos por el Ministerio del Ambiente de España (2006), para la generación de escenarios de cambio climático:

Tabla 2. Ventajas y desventajas de algunos escenarios climáticos.

| Tipo de escenario | Descripción/Uso | Ventajas | Desventajas |
|--|---|--|--|
| Salidas directas de AOGCM (modelos climáticos globales atmosfera-océano) | Punto de partida para la mayoría de escenarios climáticos. Respuesta a gran escala de la influencia antropogénica. | La información se deriva de los modelos más comprensivos y basados en variables físicas. Integraciones largas. Datos fácilmente accesibles. Muchas variables (potencialmente) disponibles. | Información espacial poco analizada y resuelta. Las características diarias pueden ser poco realistas a menos que se trate de grandes regiones. En algunas regiones se deberá trabajar con factores de corrección para los datos de precipitación. |
| Modelos regionales | Proveen información con alta resolución tempo-espacial | Provee información altamente resuelta (espacial y temporal). La información se deriva de modelos basados en la física. Muchas variables disponibles. Mejores representaciones de algunos climas extremos que los MCG. | Puede generar preocupación respecto a la integridad por la falta de dos vías de integración. Dependientes de los datos provistos (en ocasiones parcialmente) de los AOGCM. |
| Reducción de escala estadística | Provee información de alta resolución espacial. | Puede generar información en redes de alta resolución, o en regiones no uniformes. Potencial para algunas técnicas que recurren a un rango diverso de variables. Las variables son, probablemente, consistentes internamente. De rápida aplicación a GCM. | Asume constancia en relaciones empíricas en el futuro. Requiere tener acceso a observación diaria, a información de superficie y/o capas superiores de aire que se extiende por rango de variabilidad. No se producen muchas variables para algunas técnicas. Dependientes de los datos provistos (en ocasiones parcialmente) de los AOGCM. |

Adaptado de (Mearns, Giorgi, Whetton, y Pabon, 2003)

Modelos climáticos globales (MCG)

Son simuladores del sistema climático mediante la resolución de ecuaciones de las leyes y principios de la Física que gobiernan los procesos en cada componente del sistema y los intercambios de energía y masa entre sí (Castro, 2007).

Los resultados que se obtienen de los MCG, son utilizados por una serie de instituciones como es el caso del IPCC, donde se utiliza esta información dentro de los documentos que conforman los informes de evaluación generados para periodos de estudio. Permitiendo de esta manera tener la principal fuente de trabajo para trabajos de regionalización y de escenarios de cambio climático (Ministerio del Ambiente de España, 2006, p. 26).

Los MCG usualmente trabajan con escalas horizontales cercanas a los 300km, generando cuadrillas de trabajo considerablemente grandes (The PRECIS Regional Climate Modelling System, 2013).

Dentro del mismo documento presentado por el Ministerio de Ambiente de España, se demuestra que a pesar de existir una serie de reportes a nivel internacional que presentan información a nivel de modelos globales atmosférico-oceánicos, la información a escala regional es considerablemente escasa y en muchos casos termina siendo insuficiente.

Modelos climáticos regionales (MCR)

Los modelos climáticos regionales o aquellos modelos que utilizan técnicas de regionalización, tienen como fundamento la información proveniente de los modelos climáticos globales, forzando el acoplamiento de las condiciones de la zona que desea ser estudiada a la información proveniente de los datos globales. Este tipo de modelización requiere experiencia tanto para la realización del modelo en la fase de desarrollo así como para la fase de ejecución y operación del mismo. (Ministerio del Ambiente de España, 2006, p. 28).

Los MCG son modelos completos, que representan la mayor parte de los procesos e interacciones de los componentes de los modelos globales. A su vez, producen una serie de información comprensiva dentro del dominio del modelo. Además, pueden reducir las escalas horizontales de trabajo a 50km o menos (The PRECIS Regional Climate Modelling System, 2013).

En conclusión, se encuentra que los MCG trabajan con la información presente en los modelos globales, pero resultan mucho más eficientes al enfocar su estudio con zonas específicas que requieren información más detallada que la presentada por los modelos globales debido a las escalas de resolución con las cuales trabajan.

Modelos estadísticos de regionalización.

Estos modelos buscan la utilización de diversas técnicas estadísticas que permitan relacionar las diferentes variables climáticas obtenidas de modo macro, por medio de los modelos climáticos globales atmosférico-oceánicos, con aquellas variables presentes en la zona de estudio a nivel local o regional. Una de las principales ventajas presentadas por estos modelos, radica en la posibilidad de ser aplicados a variables comunes como ocurre con valores de precipitación y temperatura (Ministerio del Ambiente de España, 2006, p. 29).

Se puede utilizar modelos dinámicos para definir ecuaciones o partir de ellas como es el caso de los métodos de interpolación Kringin, IWD, Splines, entre otros, también considerados dependiendo de su aplicación y ecuaciones como estadísticos (ESRI, 2013, pp. 5-10).

1.7. Métodos de Interpolación

Dentro de las técnicas utilizadas dentro del presente estudio, se encuentran las herramientas de interpolación, donde se describe que la interpolación espacial es “un procedimiento que permite calcular el valor de una variable en una

posición del espacio, conociendo los valores de esa variable en otras posiciones del espacio". (Paredes, Salinas , Martínez y Jiménez , 2012).

Las herramientas de interpolación de superficie hacen predicciones a partir de mediciones de muestra para todas las ubicaciones en un dataset ráster de salida, ya sea que se haya tomado una medición en la ubicación o no (ESRI, 2013).

En el caso del presente estudio, las variables con las cuales se trabaja, precipitación y la temperatura, de las que se cuenta con datos que se verán agrupados en series de 10 años para conocer la evolución de dichas variables en el tiempo.

Dentro del proceso de selección de los principales métodos de interpolación, se analizan los tres comúnmente utilizados en los sistemas de información geográfica. A su vez, se busca determinar la aplicabilidad de dichos modelos a la zona de estudio considerando como ejes del desarrollo a las variables de precipitación y temperatura.

- Método de la distancia inversa (IDW)

Determina los valores de celda a través de una combinación ponderada linealmente de un conjunto de puntos de muestra. La superficie que se interpola debe ser la de una variable dependiente de la ubicación (ESRI, 2012).

Este método considera que las observaciones más cercanas deben tener un mayor nivel de influencia en los valores a predecirse, que los valores que se encuentran a mayores distancias (Rojas, 2007, p. 448)

Se considera que este método es uno de los menos complejos con resultados claramente óptimos y visibles, donde cada valor, que tiene una correspondencia con un punto determinado, influye sobre los demás, de forma

local, y disminuye proporcionalmente su efecto con la distancia (García y Cebrián, 2008).

- Interpolación local por splines

Estima valores usando una función matemática que minimiza la curvatura general de la superficie, lo que resulta en una superficie suave que pasa exactamente por los puntos de entrada (ESRI, 2012).

El método de los splines ajusta funciones polinómicas en las que las variables independientes son X e Y. Permiten realizar valoraciones de los valores máximos y mínimos dentro de los datos observados (Alonso, 2006).

Se observa que una de las principales desventajas que plantea el modelo, al punto de llegar a ser inexacto, radica en que altera ligeramente el valor y la posición de los datos, generando un resultado muy suavizado (García y Cebrián, 2008). Esto puede conllevar a que se produzca alteraciones sobre la representación de los datos de la muestra.

- Kriging

Kriging es un procedimiento geoestadístico avanzado que genera una superficie estimada a partir de un conjunto de puntos dispersados con valores Z. Incluyen la autocorrelación, es decir, las relaciones estadísticas entre los puntos medidos.
(ESRI, 2012)

Una de las ventajas que presenta este modelo al elaborar procesos de interpolación, radica en la compensación que realiza al referirse a datos agrupados por la cercanía geográfica, lo cual se obtiene al asignar una menor ponderación a los valores aislados que a los datos agrupados (Bohling, 2005, p. 3).

1.8. Modelos climáticos aplicables en el Ecuador

Si bien se realiza un acercamiento a los modelos climáticos en modo general, es necesario encontrar la aplicabilidad de dichos modelos a la realidad nacional, pero sobre todo a la zona de estudio determinada.

Tomando como base la información presentada en el ítem 1.6 del presente capítulo, se realiza un proceso de análisis que permita determinar la eficiencia de cada uno de los modelos para el territorio nacional y posteriormente para la zona de estudio.

- **Modelos climáticos globales (MCG)**

Los MCG “son herramientas enfocadas en la generación de escenarios de cambio climático destinados a la evaluación de impactos” (Busuioc, Von Storch y Schnur, 1998, p. 258), observamos que presentan una serie de inconvenientes en cuanto a la objetividad de información en zonas más limitadas de territorio, donde la información que presentan dichos modelos termina siendo deficiente debido a las grandes escalas de trabajo con las cuales realizan sus análisis, cercanas a 300km de escala horizontal (The PRECIS Regional Climate Modelling System, 2013).

Debido a la información presentada, se descarta el uso de los actuales modelos climáticos globales para generación de escenarios de cambio climático tanto para el Ecuador como para la zona de estudio.

- **Modelos Climáticos Regionales**

Al trabajar con escalas horizontales mucho menores (50km) a las presentes, en los modelos climáticos globales, es posible determinar que los modelos regionales presentan información lo suficientemente detallada como para describir la realidad del Ecuador.

Es así que se encuentran estudios realizados, donde se describe de manera clara que para el Ecuador ,existen tres modelos que son aplicables para la generación de escenarios debido a: sus características, a su escala espacial y su base matemática. Entre ellos se encuentran: el PRECIS (con resolución de 25 km), el ETA (con resolución de 56km) y el TL959 (con 20km) (Muñoz, 2010, p. 2).

Por lo tanto para la realidad nacional se determina que los modelos climáticos regionales son los modelos aplicables al Ecuador debido a la aceptación existente con la consideración de sus reducidas cuadrillas de trabajo para análisis y estudio de datos, las cuales basan sus análisis mediante modelos matemáticos en conjunto con técnicas de interpolación en sistemas de información geográfica.

- Modelos estadísticos:

Al referirse al tema de análisis estadístico se considera la utilización de un modelo específico desarrollado para un conjunto de datos. El modelo se compone de una o más ecuaciones que describen las observaciones en términos de parámetros y distribuciones y variables aleatorias (Manly, 2009, p.61).

1.8.1. Selección del modelo para la zona de estudio

Para detallar gráficamente y enfatizar en las diferencias y consecuentemente la aplicabilidad de los diversos modelos climáticos mencionados anteriormente de manera más dinámica, y consecuentemente, proceder a la selección del más efectivo, este último de acuerdo a los datos representativos de la zona de estudio, se procede a mostrar un ejemplo de la generación de escenarios presentados mediante resultados gráficos obtenidos mediante modelos globales y modelos regionales.

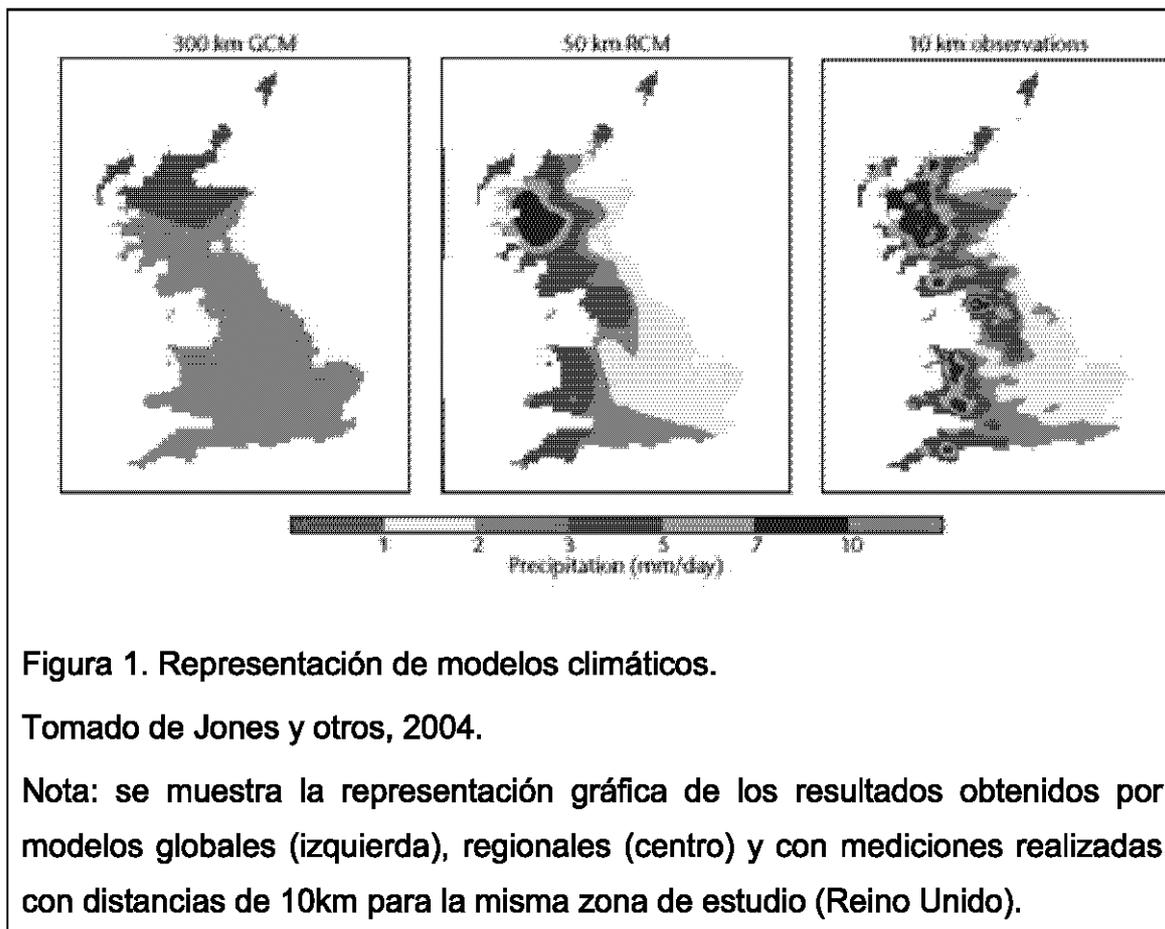


Figura 1. Representación de modelos climáticos.

Tomado de Jones y otros, 2004.

Nota: se muestra la representación gráfica de los resultados obtenidos por modelos globales (izquierda), regionales (centro) y con mediciones realizadas con distancias de 10km para la misma zona de estudio (Reino Unido).

Como se observa en la figura, los dos modelos analizan la misma zona de estudio, pero existe una enorme diferencia entre ellos, ya que a pesar de trabajar con los mismos datos y con la misma información, presentan diferentes escalas de trabajo. Es decir, que los modelos globales aplican cuadrillas de análisis mucho más grandes en términos dimensionales que los modelos regionales, lo cual conlleva directamente a la producción de modelos gráficos descriptivos con menor nivel de detalle.

A diferencia de los modelos climáticos globales, los modelos regionales presentan un mayor acercamiento al verdadero comportamiento en las zonas que se desea estudiar, debido a la generación de rejillas de estudio mucho más pequeñas que permiten una mejor cobertura para la zona planteada (Jones, et al., 2004, p. 14).

En conclusión, debido a que el presente estudio busca analizar una zona relativamente pequeña en términos geográficos, los modelos globales no lograrían presentar un acercamiento detallado de la realidad en la distribución geográfica planteada como zona de análisis, ya que se perdería gran parte de la información buscada mediante las representaciones gráficas.

De esta manera se procede a la utilización de los modelos climáticos regionales y estadísticos con bases de procesamiento sustentada en modelos matemáticos, cuyos resultados requieren de la asociación de sistemas de información geográfica para poder analizar las variaciones climáticas en el tiempo para la zona de estudio. Dicho trabajo es posible desarrollar mediante escalas horizontales inferiores a los 50km, como el modelo PRECIS, permitiendo elaborar un análisis descriptivo.

En el caso que la información presentada por los modelos planteados resulte poco precisa para ciertas zonas dentro del área de estudio, se procederá a la utilización de técnicas estadísticas y modelamiento gráfico (ESRI, 2013), que permitan detallar de manera apropiada los cambios existentes en las variables climáticas (precipitación y temperatura) analizadas a lo largo del tiempo en la zona de estudio, mediante el proceso de interpolación de datos que podrá concluir con el desarrollo de los mapas temáticos donde se muestre el proceso de evolución de los climas.

2. Análisis de Red de Datos

2.1. Análisis y ajuste de series meteorológicas

Uno de los principales aspectos a tener como consideración para poder trabajar con los datos provenientes de las estaciones meteorológicas, corresponde a la transformación de las series de valores numéricos obtenidos de los registros a datos procesados que resulten representativos de cada estación para poder trabajar de manera la manera más eficiente.

Para el presente análisis de datos, se toma como base los tres puntos de vista analizados por Monsalve (1999. p.10) donde se plantean:

1.- Valor central o dominante de la serie.

Para lo cual utiliza como base los conceptos de la media, la mediana y la moda.

2.- Dispersión o fluctuación de diversas observaciones alrededor del valor central.

Donde considera la desviación estándar y la varianza.

3.- Características de forma.

Donde se trabaja con coeficientes de oblicuidad y la variable aleatoria.

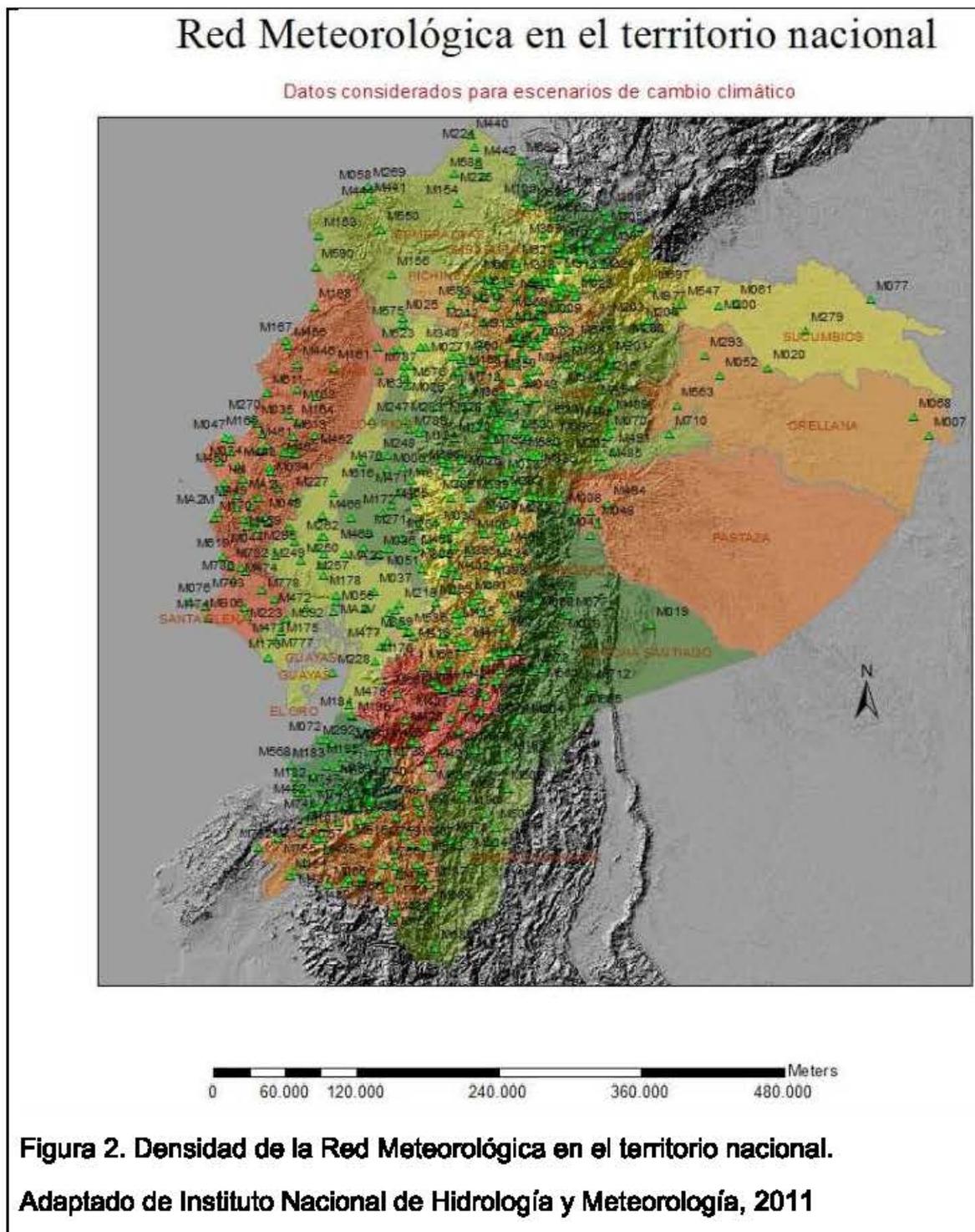
2.2. Análisis de red hidro-meteorológica existente

Estaciones Meteorológicas:

Las estaciones meteorológicas consisten en una serie de equipos instalados para medir y registrar de manera regular las diversas variables meteorológicas existentes en una zona determinada, para utilizar la información registrada en la elaboración de las predicciones meteorológicas utilizando diversos modelos numéricos y matemáticos que permitan realizar estudios climáticos (Alonso, 2008).

La primera instancia para el análisis de la red de estudio, corresponde al escrutinio de la base de datos obtenida del INAMHI con la información actualizada para el año 2011, donde se encuentra un total de 575 estaciones,

distribuidas dentro del territorio nacional. Esta distribución se presenta en el siguiente gráfico:



El siguiente paso corresponde a la determinación de los cantones que se encuentran dentro de la zona de análisis correspondiente a la región Sierra norte del Ecuador, donde se encuentran intersectados los siguientes cantones:

Tabla 3 Cantones dentro de la zona de estudio

| | | |
|-------------|--------------------------------|----------------------|
| GUARANDA | EL CHACO | PIMAMPIRO |
| TULCAN | QUIJOS | MOCHA |
| BOLIVAR | CARLOS JULIO AROSEMENA TOLA | PALORA |
| ESPEJO | PASTAZA | TENA |
| MIRA | MERA | ARCHIDONA |
| MONTUFAR | SANTA CLARA | GONZALO PIZARRO |
| PATATE | ARAJUNO | SUCUMBIOS |
| LATACUNGA | QUITO | LORETO |
| PANGUA | CAYAMBE | SANTO DOMINGO |
| PUJILI | MEJIA | LAS GOLONDRINAS |
| SALCEDO | PEDRO MONCAYO | ANTONIO ANTE |
| SAQUISILI | RUMIÑAHUI | COTACACHI |
| SIGCHOS | SAN MIGUEL DE LOS BANCOS | OTAVALO |
| RIOBAMBA | PEDRO VICENTE MALDONADO | SAN PEDRO DE PELILEO |
| GUANO | AMBATO | SANTIAGO DE PILLARO |
| PENIPE | BAÑOS DE AGUA SANTA | TISALEO |
| ELOY ALFARO | CEVALLOS | IBARRA |
| QUININDE | SAN MIGUEL DE URCUQUI | QUERO |
| SAN LORENZO | SAN PEDRO DE HUACA | |

Nota: Se describen todos los cantones que se encuentran dentro de la zona de estudio, donde se observa la existencia de estaciones meteorológicas.

Como parte del análisis de la red meteorológica para el presente estudio, se identifican todas las estaciones que se encuentran dentro de la zona especificada, se muestran en la Figura 3:

Red Meteorológica en la zona de estudio

Datos considerados para escenarios de cambio climático

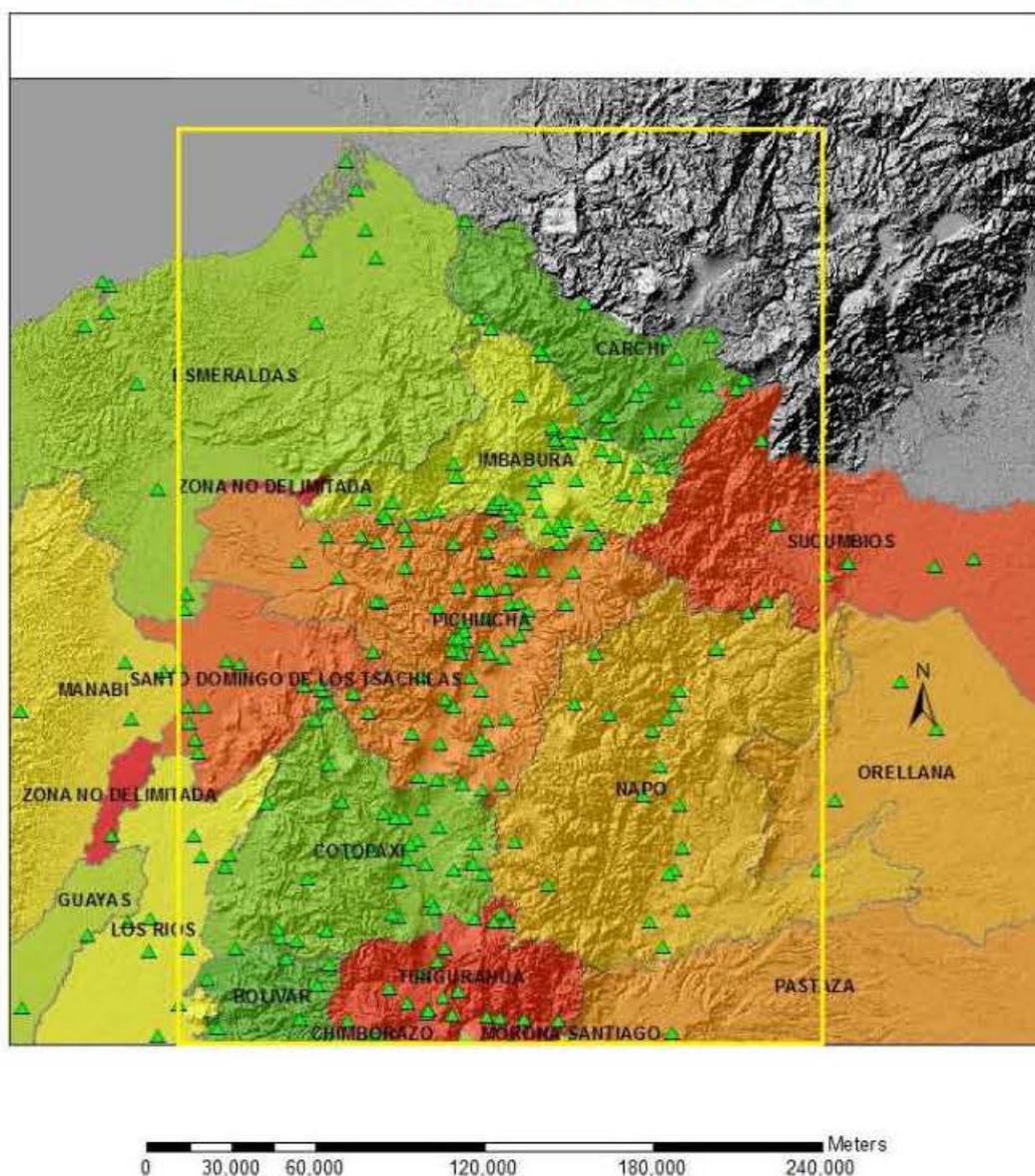


Figura 3. Densidad de la Red Meteorológica existente para la región sierra Norte.

Adaptado de Instituto Nacional de Hidrología y Meteorología, 2011

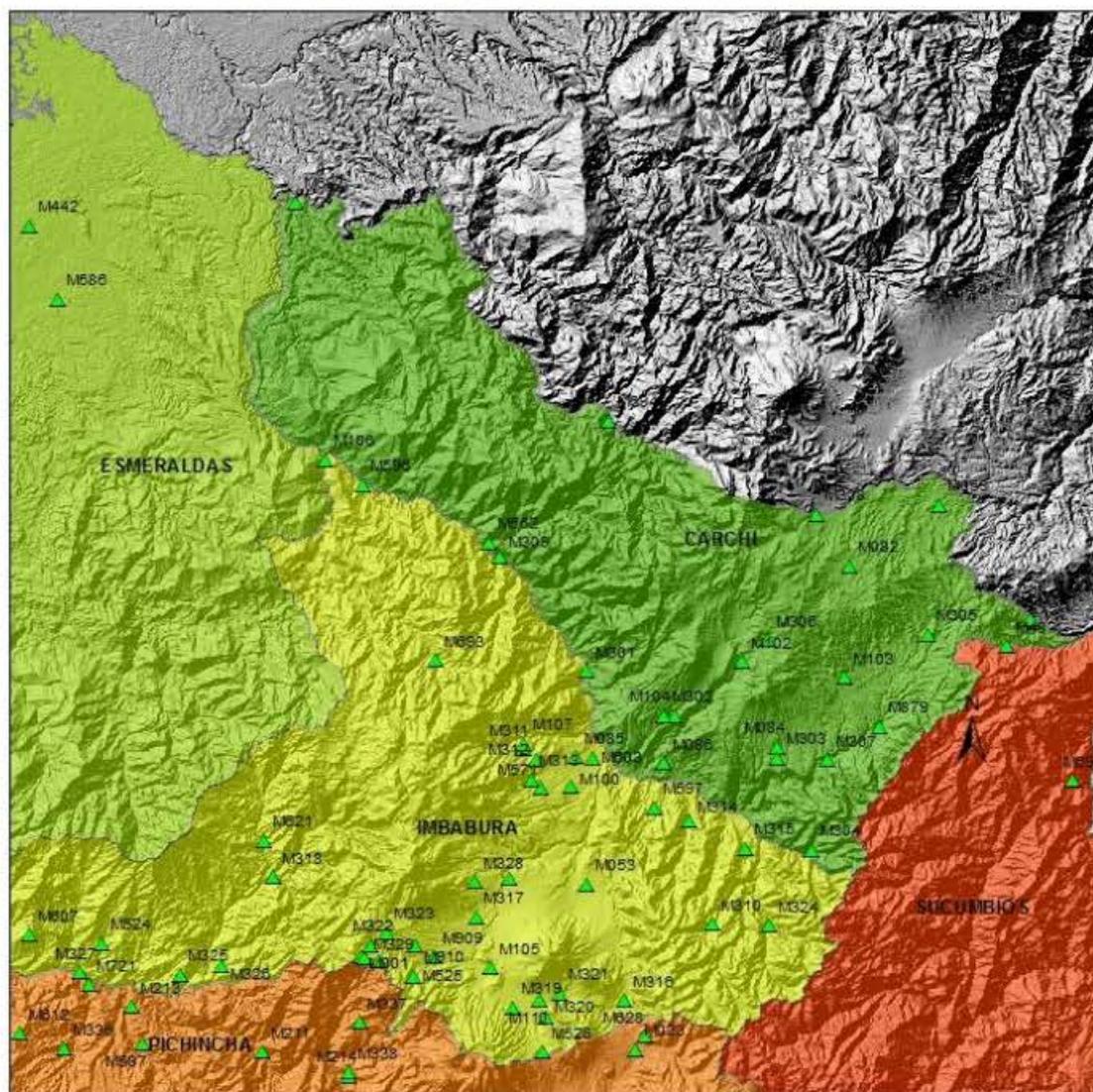
Para realizar un análisis por ubicación geográfica de las estaciones meteorológicas de la red seleccionada en la región de estudio, y observar de manera más detalladas los resultados del análisis de la información en mapas temáticos se realizó el estudio la distribución en tres sub-zonas:

- La Zona Norte que será denominada Zona 1 donde se encuentran el Este de Esmeraldas, Carchi, el Norte de Imbabura y el Este de Sucumbíos.
- La Zona 2 que corresponde a la zona central, donde se encuentran el centro y sur de Imbabura, Pichincha, Santo Domingo de los Tsáchilas y el noroeste de Napo.
- La zona 3 que corresponde al sur de la región de estudio, donde encontramos el sur de Pichincha, Cotopaxi, el norte de Bolívar, Tungurahua, el sur de Napo y el norte de Pastaza.

Para generar un mayor acercamiento a la distribución de las estaciones dentro de la zona de estudio, se presentan los mapas de la ubicación geográfica de cada una de las zonas con sus respectivas estaciones meteorológicas en las figuras 4, 5 y 6:

Red Meteorológica en la zona de estudio

Datos considerados para escenarios de cambio climático



0 12,000 24,000 48,000 72,000 96,000 Meters

Figura 4. Red Meteorológica Existente para la zona 1.

Adaptado de Instituto Nacional de Hidrología y Meteorología, 2011

Red Meteorológica en la zona de estudio

Datos considerados para escenarios de cambio climático

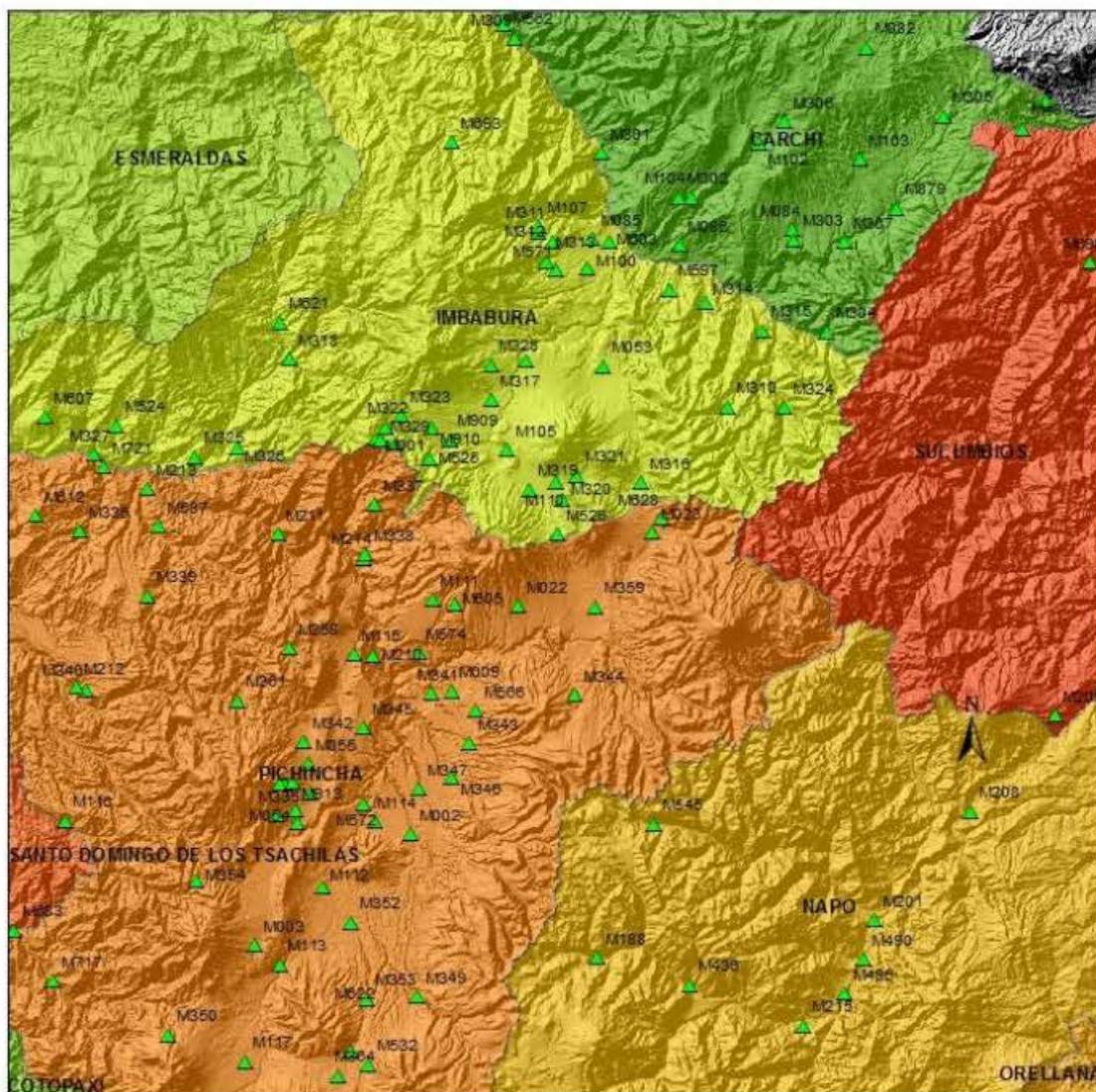


Figura 5. Red Meteorológica Existente para la zona 2.

Adaptado de Instituto Nacional de Hidrología y Meteorología, 2011

Una vez realizada la división del área de estudio, se procede a un análisis de la información presente en la base de datos del INAMHI, donde se determina las estaciones que presentan datos aplicables para el estudio. Este se basa en la cantidad y fiabilidad de los datos presentes para cada una. De este modo, la red de análisis para evaluar el cambio climático en la zona de estudio, se presenta en la tabla 4:

Tabla 4 Listado de estaciones Hidrometeorológicas con datos aplicables al estudio

| CODIGO | ALTURA | ESTE_X | NORTE_Y | ESTACION |
|--------|--------|--------|----------|-----------------------|
| M008 | 958 | 838511 | 9833352 | PUYO |
| M024 | 2789 | 779647 | 9980274 | IÑAQUITO |
| M029 | 1785 | 787136 | 9845975 | BAÑOS |
| M053 | 2249 | 819078 | 10038259 | IBARRA AEROPUERTO |
| M055 | 2811 | 779273 | 9984243 | QUITO AEROPUERTO-DAC |
| M059 | 2960 | 866666 | 10089877 | TULCAN AEROPUERTO |
| M063 | 1065 | 826886 | 9833420 | PASTAZA AEROPUERTO |
| M064 | 2792 | 765350 | 9900795 | LATACUNGA AEROPUERTO |
| M102 | 2990 | 840098 | 10068517 | EL ANGEL |
| M103 | 2790 | 853778 | 10066399 | SAN GABRIEL |
| M105 | 2534 | 806123 | 10026935 | OTAVALO |
| M107 | 2365 | 810457 | 10057330 | CAHUASQUI-FAO |
| M128 | 2960 | 765648 | 9846967 | PEDRO FERMIN CEVALLOS |
| M154 | 30 | 726467 | 10094563 | CAYAPAS |
| M258 | 2885 | 766447 | 9848762 | QUEROCHACA |

Adaptado de: Instituto Nacional de Hidrología y Meteorología (INAMHI)

Nota: se describen las estaciones con los datos referentes al código de la estación, la altura a la que se encuentra, las coordenadas y el nombre de la estación.

2.3. Recopilación de Cartografía base y temática existente

La recopilación cartográfica para el presente trabajo, tiene como sustento la base de datos presentada de manera abierta al público mediante el Sistema Nacional de Información (SNI) en su página web.

Debido a la naturaleza del presente estudio, gran parte de la información se engloba dentro del Sistema Ambiental, donde encontramos al Sistema de Información Geográfica y Agropecuaria (SIGAGRO), el Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca (MAGAP) y el ya mencionado INAMHI. Mientras que la mayor parte de información base proviene del Instituto Geográfico Militar (IGM) y del Instituto Nacional de Estadística y Censo (INEC). A continuación se presenta la información organizada por sistemas.

Sistema Ambiental:

Sistema Nacional de Bosques y Vegetación Protectora: MAE: 2013

Aptitud Forestal Sierra: SIGAGRO 2003 Caracterización de aptitud forestal en la sierra

Taxonomía Sierra: SIGAGRO 2003

Textura Sierra: SIGAGRO 2003

Uso del suelo Sierra: SIGAGRO 2003

Déficit Hídrico: MAGAP-INAMHI: 2002: Zonas con poca irrigación en el Ecuador

Unidades hidrográficas N5: SENAGUA: 2005: División hidrográfica mediante metodología Pfafstetter

SNAP: MAE: 2008: Sistema Nacional de Áreas Protegidas

Zonas Intangibles: MAE: 2008: Áreas declaradas zona intangible

Áreas de inundación: INAMHI-MAGAP: 2002

Isotermas: INAMHI-MAGAP: 2002

Isoyetas: INAMHI-MAGAP: 2002

Cuencas Hidrográficas: INAMHI-MAGAP: 2002: Distribución de las cuencas por vertientes, e información hidrológica superficial

Sistema Económico:

Aptitud agrícola: MAGAP: Tipologías de aptitud agrícola

Sistemas Referenciales:

Zonas de planificación: SENPLADES: 2010: Nueve Zonas de Planificación del Ecuador

Información Base: IGM: 2013: Coberturas Base IGM

DPA referencial: Cantones : INEC: 2011: División administrativa referencial

DPA referencial: Provincias: INEC: 2011: División administrativa referencial

DPA referencial: Parroquias : INEC: 2011: División administrativa referencial

Hidro-Geológico: MAGAP: 2005: Formaciones, litología metodología Pfafstetter

2.4. Recopilación SRTM 30 o 90

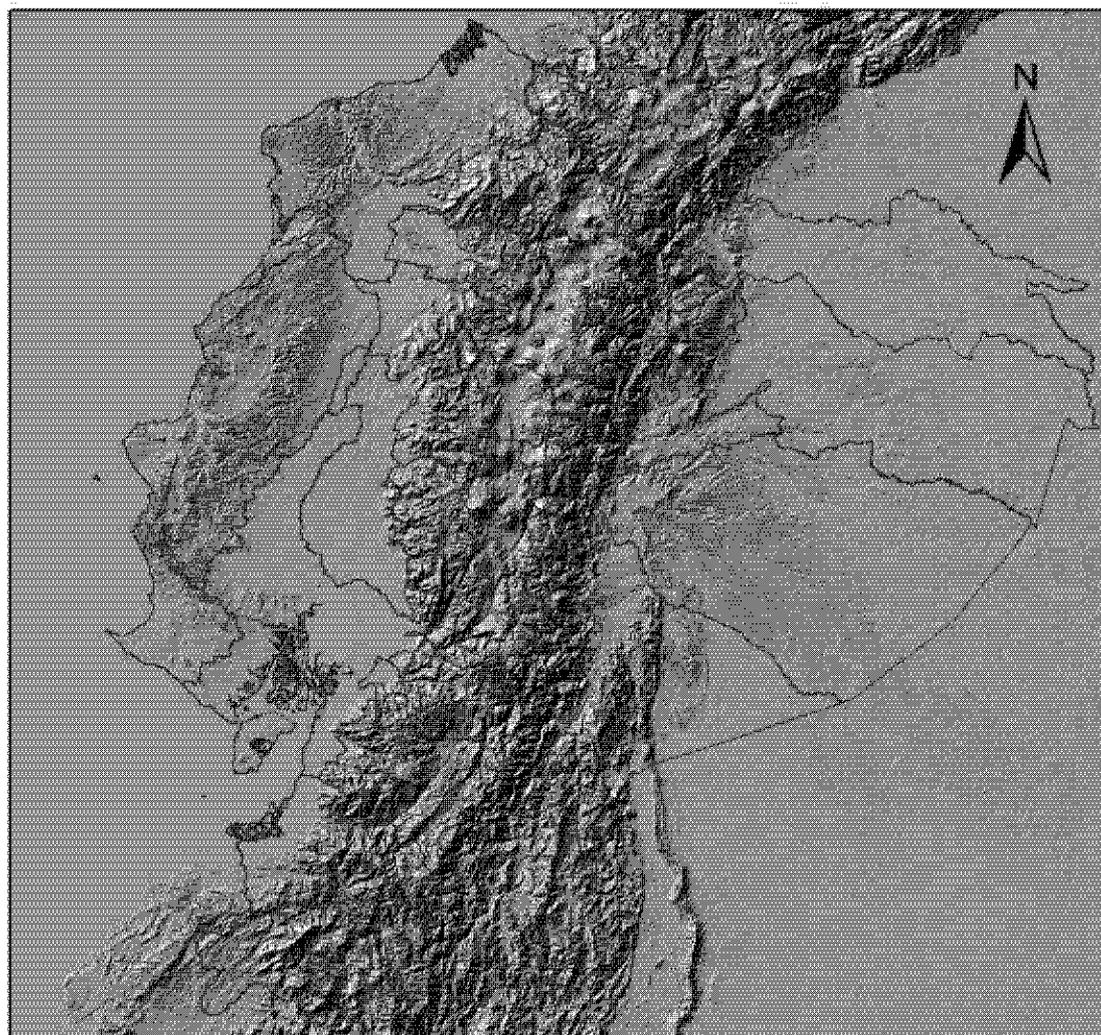
SRTM es el acrónimo de Shuttle Radar Topography Mission. El objetivo de esta misión fue obtener datos de las elevaciones encontradas a nivel mundial para generar una base de datos topográfica digital del planeta Tierra.

El SRTM consistía básicamente en un sistema de radar especialmente modificado que voló a bordo del transbordador espacial Endeavour durante una misión de 11 días en febrero del año 2000.

SRTM fue un proyecto internacional liderado por la NGA (National Geospatial-Intelligence Agency) y la NASA (National Aeronautics and Space Administration) (NASA, 2009) .

Para el presente estudio se presentan las imágenes SRTM de relieve así como el modelo digital de terreno para todo el territorio del Ecuador, presentando en primera instancia el modelo del relieve, seguido del modelo digital que sirve de base topográfica para el cálculo e interpolación de los modelos seleccionados.

Cartografía SRTM para el Ecuador



0 55 110 220 330 440 Kilometers

Srtm_Relieve

Valores

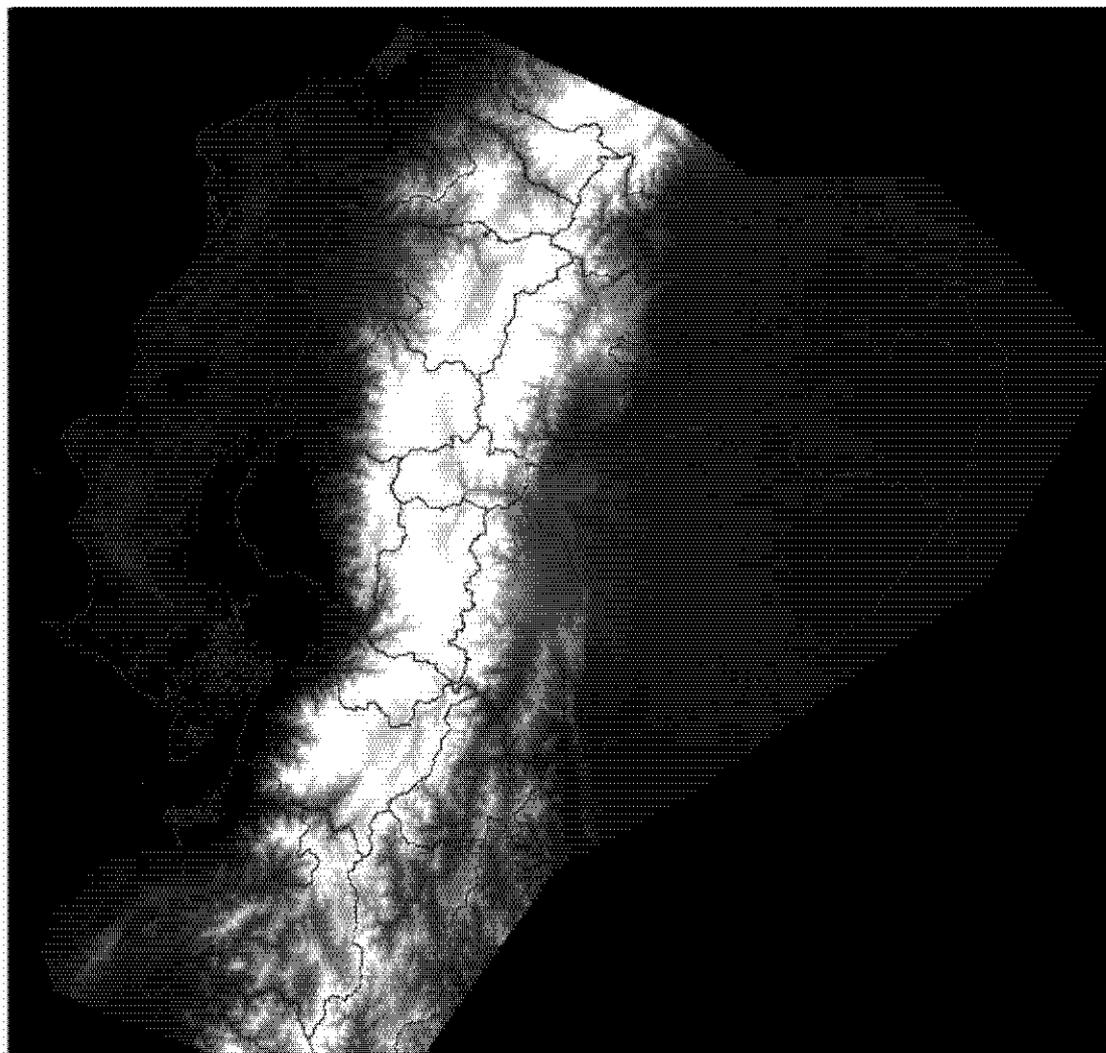
High: 255

Low: 0

Figura 7. SRTM de relieve del Ecuador.

Adaptado del Instituto Ecuatoriano Espacial, 2013

Cartografía SRTM para el Ecuador



0 60 120 240 360 480 Kilometers

Srtm_wgs84

Valores



Figura 8. SRTM del Ecuador

Adaptado del Instituto Ecuatoriano Espacial, 2013

2.5. Medias multi-modelo de Precipitación Media

Para el desarrollo de la información correspondiente a las medias multi-modelo de precipitación, se trabaja con el Sistema Nacional de Información que proporciona los datos correspondientes a la distribución de precipitaciones, en el territorio nacional, en mapas de datos desarrollados mediante la utilización de herramientas de los sistemas de información geográfica, obteniendo un mapa de Isoyetas correspondiente al Ecuador.

Una vez obtenida la información que se presenta en la Figura 10, se procede a realizar un mayor acercamiento a la zona de estudio, para observar de manera más acertada las diversas variaciones existentes, en cuanto a la distribución de precipitación en las diversas áreas que se encuentran en la zona de estudio.

Posteriormente se realiza un estudio del histórico de promedios de precipitaciones anuales mediante un reconocimiento de la base de datos del INAMHI, donde se presentan una serie de datos correspondientes a los registros de las precipitaciones existentes en cada una de las estaciones con un punto de partida de recolección de datos en los años 70.

La mayor parte de las estaciones en las cuales se presentaban datos de precipitaciones fueron descartadas debido a la falta de información continua que refleje el verdadero comportamiento de las precipitaciones en cada una de las zonas donde se localizan las estaciones, ya que los vacíos mensuales impiden generar una valoración realista de los promedios anuales y posteriormente la realización de las series de tiempo propuestas.

Por este motivo las estaciones seleccionadas en la zona de estudio, descritas en la Tabla 3, son las estaciones que permiten realizar un análisis adecuado de la evolución y variaciones existentes a lo largo de un periodo de tiempo considerable (30 años), permitiendo así la agrupación de la información en series de datos que conllevan a un análisis más adecuado, información que se presenta en la Tabla 5.

Mapa de Isoyetas del Ecuador

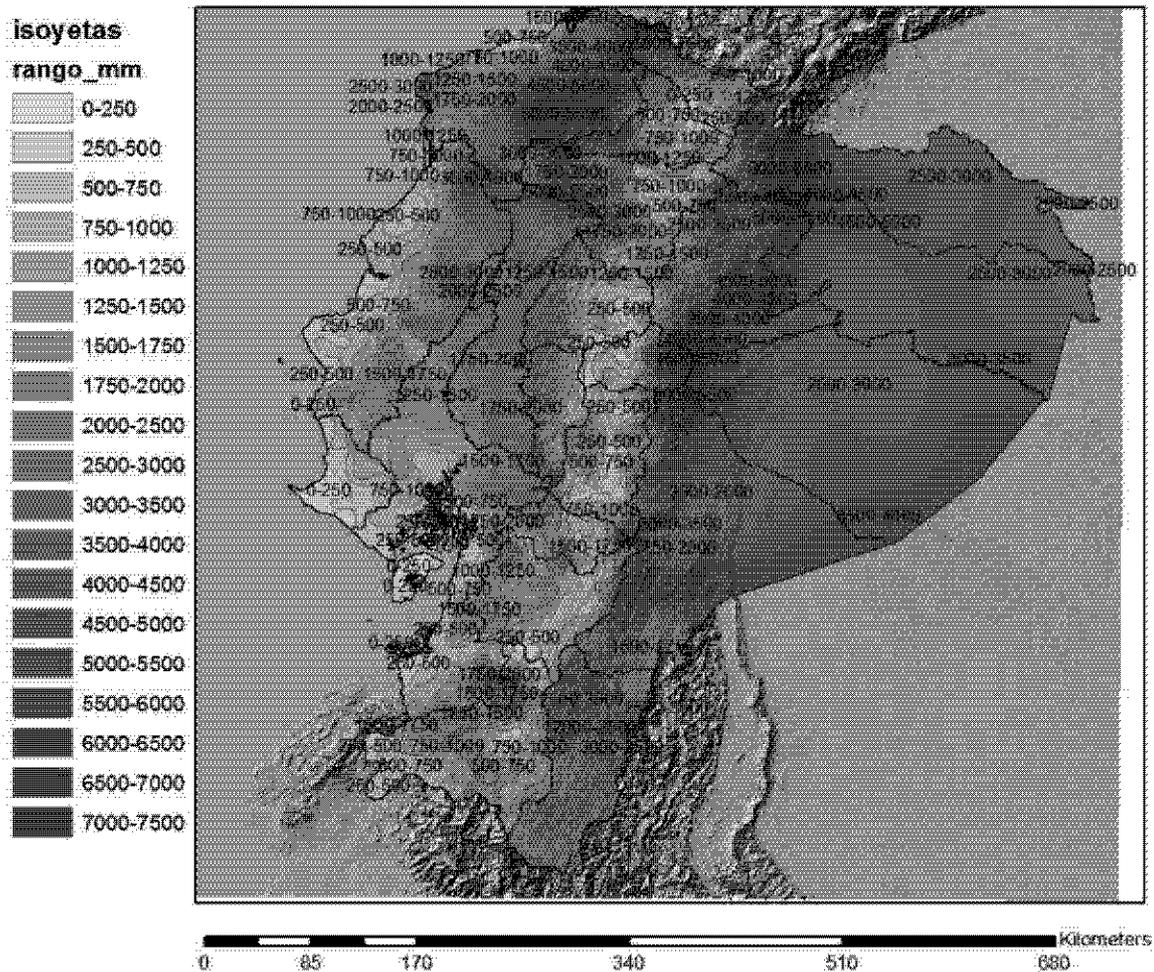


Figura 9. Mapa de Isoyetas del Ecuador.

Adaptado de la Base de datos del SNI, INAMHI-MAGAP, 2002

Mapa de Isoyetas en la zona de estudio

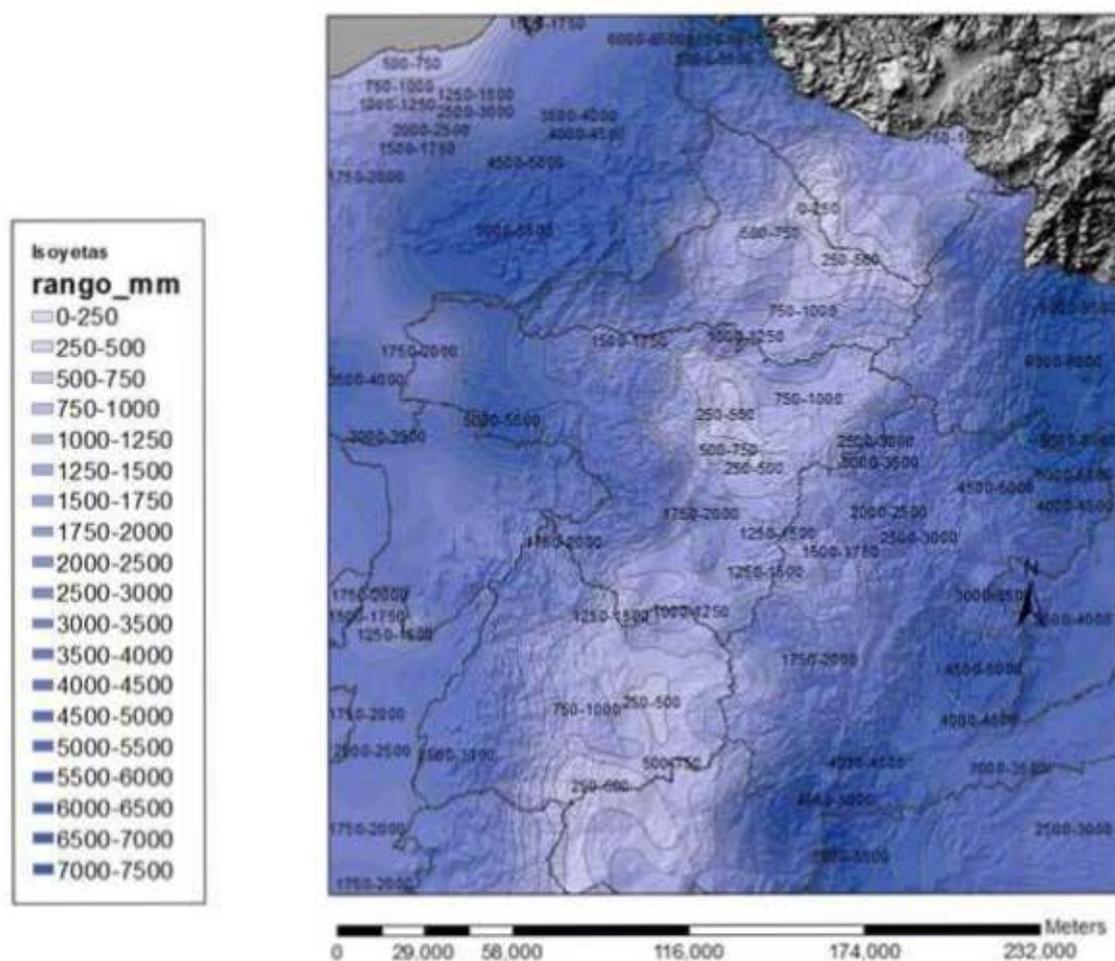


Figura 10. Mapa de Isoyetas en la zona de estudio

Adaptado de la Base de datos del SNI, INAMHI-MAGAP, 2002

Tabla 5 Histórico de promedios de precipitación

| CODIGO | ALTURA | ESTE_X | NORTE_Y | ESTACION | 1980-1989 | 1990-1999 | 2000-2009 | ÚLTIMAS 3 DECADAS |
|--------|--------|--------|----------|-----------------------|-----------|-----------|-----------|-------------------|
| M008 | 958 | 838511 | 9833352 | PUYO | 4592.1 | 4440.9 | 4795.8 | 4609.6 |
| M024 | 2789 | 779647 | 9980274 | ÍÑAQUITO | 1063.8 | 1141.2 | 1067.4 | 1090.8 |
| M029 | 1785 | 787136 | 9845975 | BAÑOS | 1479.2 | 1338.1 | 1436.4 | 1417.9 |
| M053 | 2249 | 819078 | 10038259 | IBARRA AEROPUERTO | 616.4 | 616 | 628.6 | 620.4 |
| M055 | 2811 | 779273 | 9984243 | QUITO AEROPUERTO-DAC | 1009.4 | 1000.3 | 957.7 | 989.1 |
| M059 | 2960 | 866666 | 10089877 | TULCAN AEROPUERTO | 924.5 | 863.6 | 878.7 | 888.9 |
| M063 | 1065 | 826886 | 9833420 | PASTAZA AEROPUERTO | 5550 | 5396 | 5307.4 | 5417.8 |
| M064 | 2792 | 765350 | 9900795 | LATACUNGA AEROPUERTO | 498.2 | 584.9 | 548.2 | 543.8 |
| M102 | 2990 | 840098 | 10068517 | EL ANGEL | 933 | 858 | 826.8 | 872.6 |
| M103 | 2790 | 853778 | 10066399 | SAN GABRIEL | 983.1 | 1007.6 | 1007.6 | 999.4 |
| M105 | 2534 | 806123 | 10026935 | OTAVALO | 888.7 | 865.8 | 894.2 | 882.9 |
| M107 | 2365 | 810457 | 10057330 | CAHUASQUI-FAO | 669.1 | 696.4 | 718.8 | 694.8 |
| M128 | 2960 | 765648 | 9846967 | PEDRO FERMIN CEVALLOS | 517.6 | 507.8 | 543.8 | 523.1 |
| M154 | 30 | 726467 | 10094563 | CAYAPAS | 3137 | 3032.4 | 3685.9 | 3285.1 |
| M258 | 2885 | 766447 | 9848762 | QUEROCHACA | 592.9 | 574.9 | 618.6 | 595.5 |

Nota: Se analizan los históricos de promedios para valores de precipitación, con los datos provenientes de las estaciones meteorológicas determinadas dentro de la zona de estudio, realizando la agrupación de los datos en series de 10 años para los 30 años de información presente y determina los promedios anuales de precipitación. Fuente: INAMHI 2012

2.6. Medias multi-modelo de Temperatura Media

Para desarrollar las medias multi modelo de temperatura se trabaja de igual manera como se realizó previamente con las medias de precipitación.

El primer acercamiento para este análisis se obtiene mediante el SNI, el cual provee la información para el desarrollo de las isotermas para el Ecuador, generados mediante herramientas de los sistemas de información geográfica.

Con los sistemas de información geográfica se desarrolla el mapa de isotermas para todo el territorio del Ecuador, el cual se observa en la figura 11, donde se evidencia la poca claridad de acceso a la información debido a la elevada cantidad de variaciones en cuanto a zonas de temperatura en la distribución total del Ecuador.

Debido a la poca claridad de información presentada por el mapa completo del territorio del Ecuador, se procede a realizar el correspondiente acercamiento a la zona de estudio para observar más en detalle los predomios de temperatura existentes.

El siguiente punto de desarrollo se obtiene al utilizar la misma agrupación de estaciones meteorológicas con los datos correspondientes a la temperatura, así se procede a trabajar con las medias anuales agrupadas en los periodos de tiempo planteados (series de 10 años).

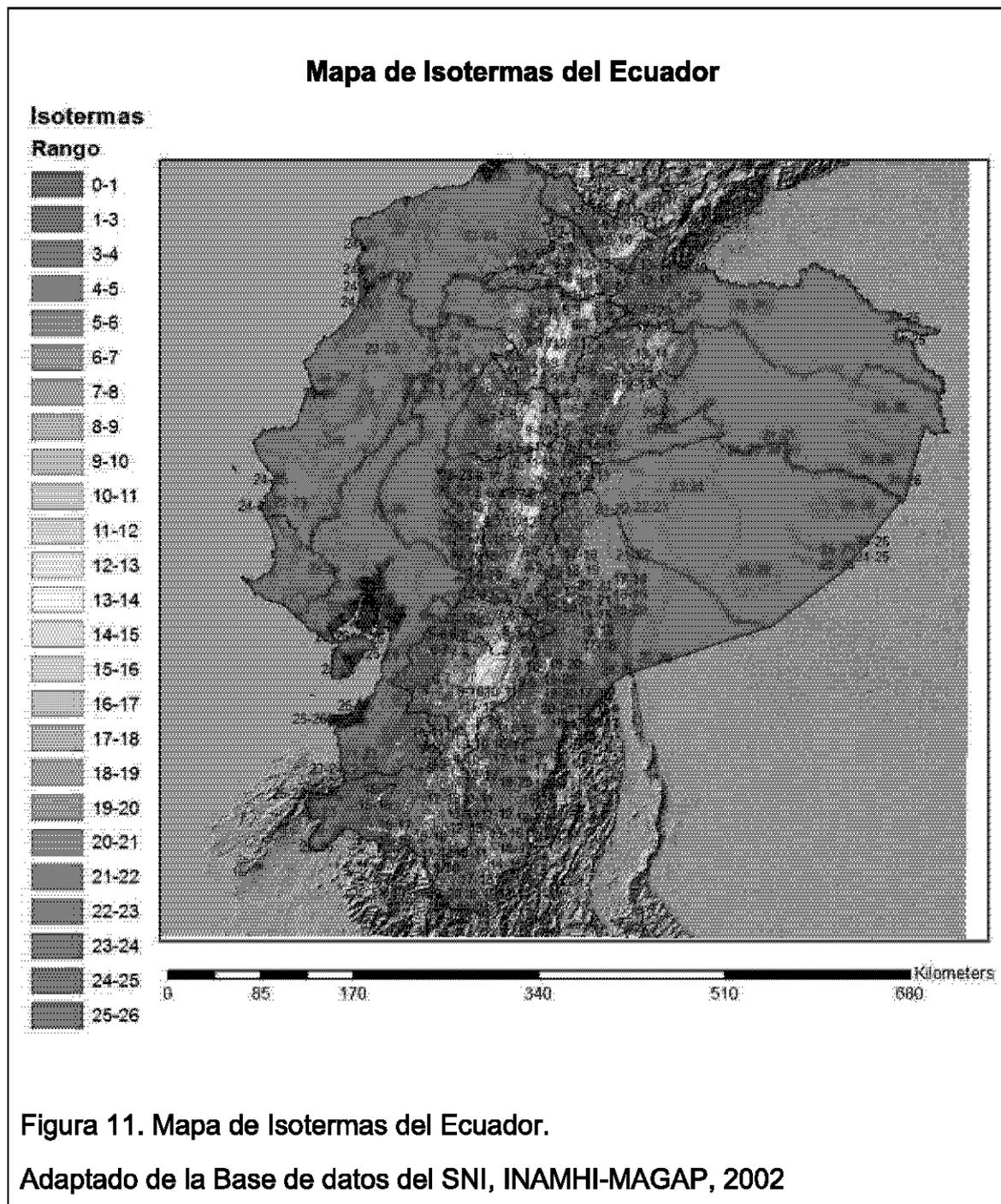


Figura 11. Mapa de Isothermas del Ecuador.

Adaptado de la Base de datos del SNI, INAMHI-MAGAP, 2002

Mapa de isotermas en la zona de estudio

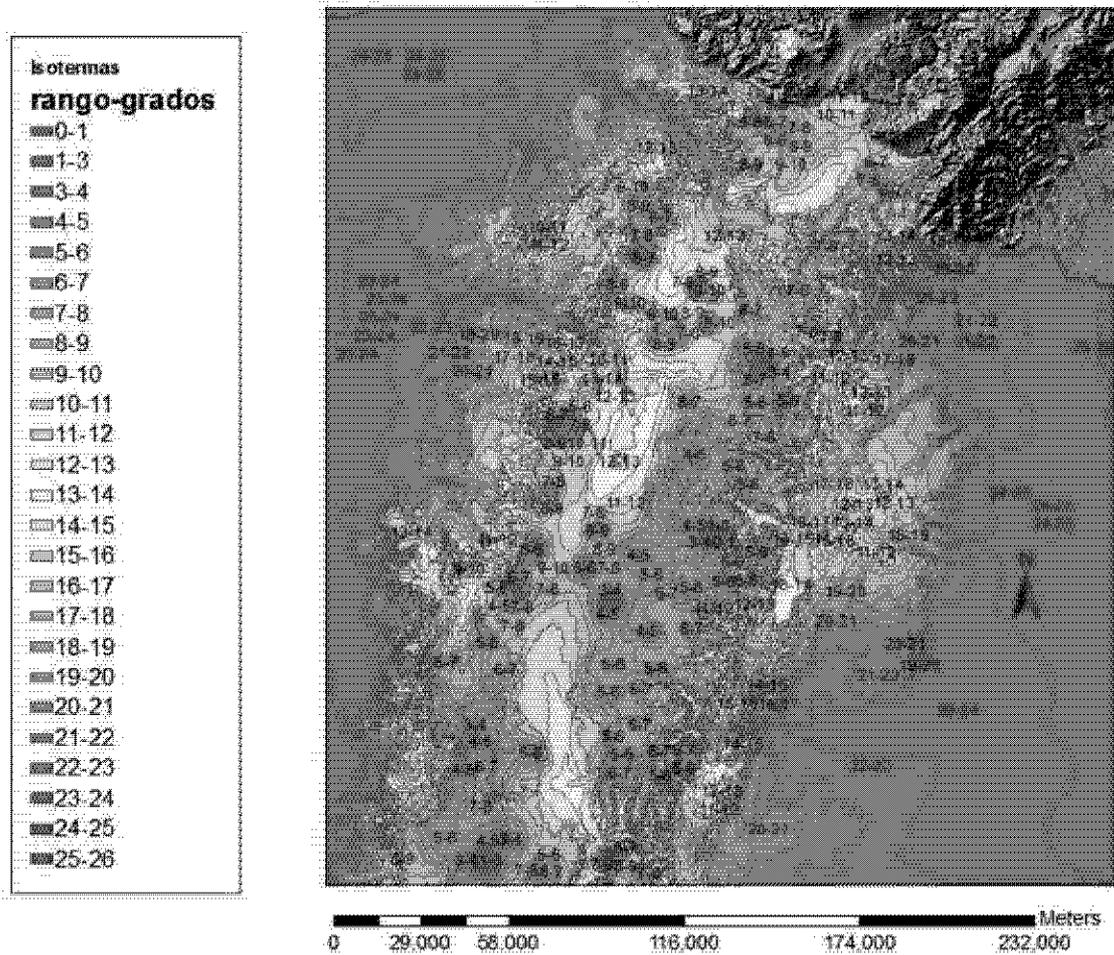


Figura 12. Mapa de Isotermas en la zona de estudio

Adaptado de la Base de datos del SNI, INAMHI-MAGAP, 2002

Tabla 6 Histórico de promedios de temperatura

| CODIGO | ALTURA | ESTE_X | NORTE_Y | ESTACION | 1980-1989 | 1990-1999 | 2000-2009 | ULTIMOS 30 AÑOS |
|--------|--------|--------|----------|-----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------------|
| M008 | 958 | 838511 | 9833352 | PUYO | 20.9 | 21.13 | 21.24 | 21.077 |
| M024 | 2789 | 779647 | 9980274 | IÑAQUITO | 14.48 | 14.91 | 15.15 | 14.845 |
| M029 | 1785 | 787136 | 9845975 | BAÑOS | 17.48 | 18.03 | 17.75 | 17.826 |
| M053 | 2249 | 819078 | 10038259 | IBARRA AEROPUERTO | 17.04 | 18.44 | 18.34 | 17.938 |
| M055 | 2811 | 779273 | 9984243 | QUITO AEROPUERTO-DAC | 13.82 | 13.77 | 13.92 | 13.835 |
| M059 | 2960 | 866666 | 10089877 | TULCAN AEROPUERTO | 12.5 | 13.45 | 13.2 | 13.05 |
| M063 | 1065 | 826886 | 9833420 | PASTAZA AEROPUERTO | 21.47 | 21.87 | 21.44 | 21.591 |
| M064 | 2792 | 765350 | 9900795 | LATACUNGA AEROPUERTO | 15.19 | 14.76 | 14.01 | 14.65 |
| M102 | 2990 | 840098 | 10068517 | EL ANGEL | 11.58 | 11.96 | 12.11 | 11.882 |
| M103 | 2790 | 853778 | 10066399 | SAN GABRIEL | 12.08 | 12.17 | 12.53 | 12.262 |
| M105 | 2534 | 806123 | 10026935 | OTAVALO | 14.71 | 14.76 | 14.7 | 14.724 |
| M107 | 2365 | 810457 | 10057330 | CAHUASQUI-FAO | 16.4 | 16.73 | 16.69 | 16.61 |
| M128 | 2960 | 765648 | 9846967 | PEDRO FERMIN CEVALLOS | 12.41 | 12.69 | 12.67 | 12.585 |
| M154 | 30 | 726467 | 10094563 | CAYAPAS | 25.91 | 26.08 | 26.12 | 26.023 |
| M258 | 2885 | 766447 | 9848762 | QUEROCHACA | 12.53 | 12.76 | 12.62 | 12.662 |

Nota: Se analizan los históricos de promedios para valores de temperatura, con los datos provenientes de las estaciones meteorológicas determinadas dentro de la zona de estudio, realizando la agrupación de los datos en series de 10 años para los 30 años de información presente, analizando las medias anuales. Fuente: INAMHI 2012

3. Modelos y gráficos

3.1. Regionalización de zonas climáticas en el Ecuador

Dentro de los diversos métodos para clasificar climas dentro del Ecuador, encontramos que pueden ser complejos o relativamente sencillos, dependiendo de los factores que se disponen a incluir dentro del análisis (Pourrut, 1995). Para el presente estudio, se analizan dos métodos basados en los datos presentes para el análisis de la información correspondiente a los valores de precipitación y temperatura.

En primer lugar se analiza la metodología presentada por el Ministerio del Ambiente, MAE (2012) donde se trabaja con índices bioclimáticos, y en segundo lugar, la metodología de Pierre Pourrut que trabaja con tres factores para determinar los climas en una región específica.

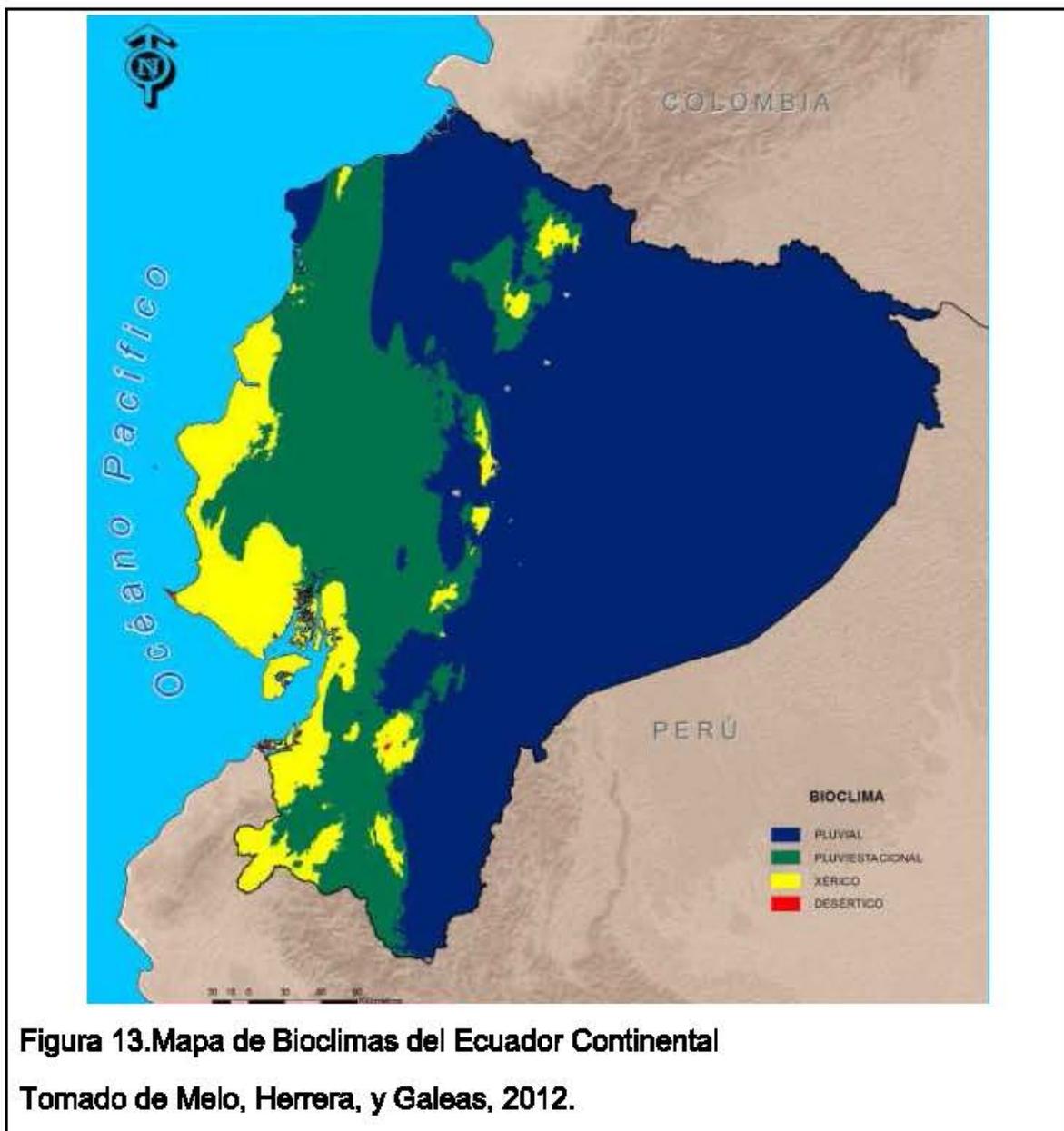
3.1.1. Metodología MAE.

La metodología propuesta por el MAE (2012), se sustenta en el concepto de Bioclimatología, donde se explica que la bioclimatología consiste en el estudio de la o las relaciones existentes entre los factores climáticos y la distribución de los seres vivos en la Tierra. Para ello se busca relacionar los valores numéricos del clima (temperatura y precipitación) con las zonas de distribución de las plantas y de sus formaciones vegetales (Melo , Herrera y Galeas, 2012).

Analizando un poco más este concepto, se encuentra que dentro de los principales objetivos de la bioclimatología, se presenta como prioridad la generación de una relación directa entre el clima y los seres vivos para crear unidades tipológicas de valor predictivo global (Rivas-Martinez, 2004).

Dentro de las diversas clasificaciones bioclimáticas propuestas encontramos algunas como las presentadas por Köppen (1918, 1931), Gaussen (1954,

1955), Holdridge (1967) y Walter (1970, 1976). Pero en el caso particular del Ecuador se considera trabajar con la propuesta realizada por Rivas Martínez; ya que se menciona en el documento presentado por el Ministerio del Ambiente del Ecuador denominado: "Modelo bioclimático del Ecuador continental", que este modelo en particular tiende a cubrir varias de las deficiencias de otros sistemas, principalmente la correlación entre clima y vegetación, y el poder "obtener un valor predictivo para cualquier zona, independiente a que si se presentan de manera única los datos referentes al clima, o únicamente los tipos de vegetación" (Melo , Herrera , y Galeas, 2012).



3.1.2. Metodología Pourrut

En el caso de la metodología de Pierre Pourrut se realiza una diferente consideración al para el proceso de regionalización de climas, ya que utiliza variables numéricas cuya fuente son valores de precipitación y temperatura, eliminando de la ecuación factores referentes a parámetros biológicos. Así se presentan que los criterios a tomarse en cuenta en la metodología de Pierre Pourrut:

En primera instancia la caracterización del régimen de lluvias, utilizando el número anual de máximos pluviométricos tomando como referencia los picos anuales de precipitación. De este análisis se obtienen los regímenes:

- Ecuatorial, cuando se observa dos picos pluviométricos.
- Tropical, cuando se registra únicamente un máximo lluvioso y una sola estación seca muy marcada.
- Subtropical, puede o no tener estaciones secas, son intermedias entre Tropical y Ecuatorial. Se encuentra en temperaturas entre 18 y 22°C.
- Uniforme, cuando las lluvias están bien distribuidas a lo largo del año.

En segundo lugar se busca determinar la altura anual representada en milímetros (mm) de la precipitación anual, de la cual se obtienen los siguientes tipos:

- Árido, inferior a 250mm.
- Seco, entre 250 y 500mm.
- Semi-húmedo, entre 500 y 1000mm.
- Húmedo, entre 1000 y 2000mm.
- Muy húmedo, entre 2000 y 3000mm.
- Lluvioso, superior a 3000mm.

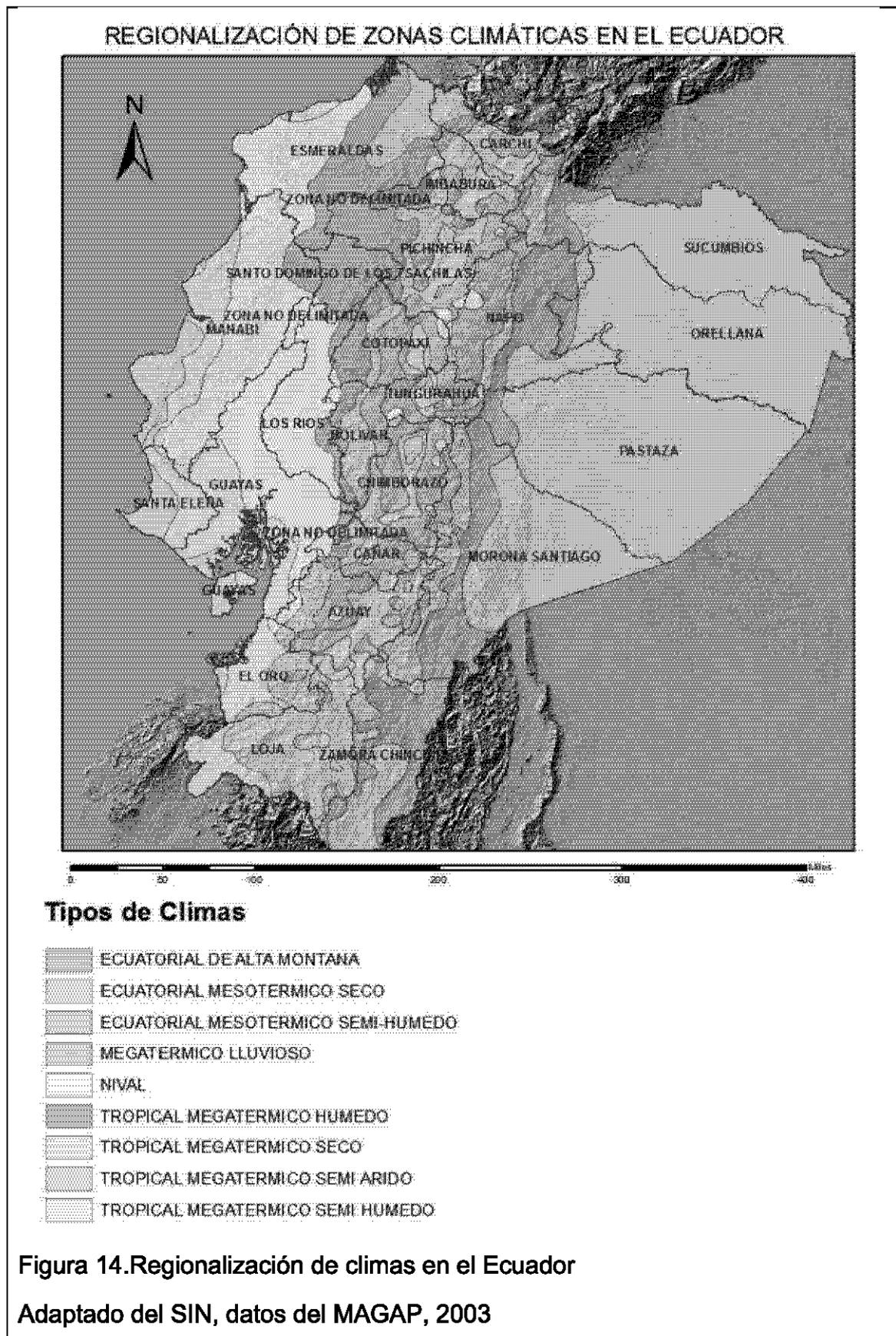
Por último se busca clasificar las temperaturas anuales, donde se analizan las medias anuales, donde se producen las siguientes clases:

- Megatérmico, temperaturas medias superiores a 22 °C
- Mesotérmico, entre 12 y 22°C.
- Frío, entre 8 y 12°C.
- De alta montaña, entre 4 y 8°C.
- Nival, temperaturas inferiores a 4°C.

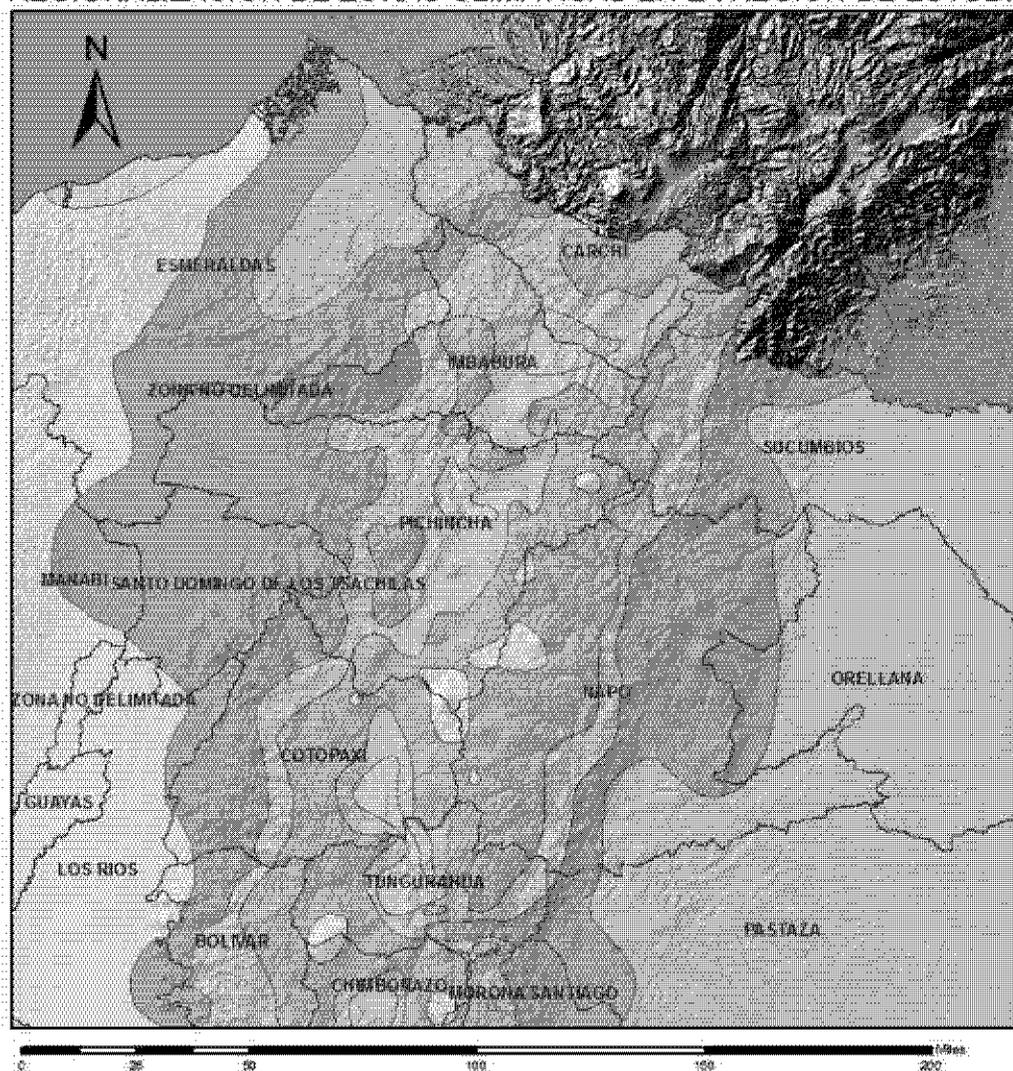
Para realizar un primer acercamiento a la realidad existente en la zona de estudio en cuanto a la regionalización de climas, se procedió a trabajar con la información base entregada por el Ministerio de Agricultura Ganadería Acuacultura y Pesca (MAGAP, 2013), en la cual se presenta el esquema de regionalización de climas a nivel nacional.

Dentro de la información presentada, podemos observar que se presentan de manera definida y distribuidos a nivel nacional los siguientes climas, que se mostrarán de manera didáctica en la figura 14:

- Tropical Megatérmico semi-árido
- Tropical Megatérmico seco
- Tropical Megatérmico semi-húmedo
- Tropical Megatérmico húmedo
- Megatérmico lluvioso
- Ecuatorial de alta montaña
- Ecuatorial Mesotérmico seco
- Ecuatorial Mesotérmico semi-húmedo
- Nival



REGIONALIZACIÓN DE ZONAS CLIMÁTICAS EN LA REGIÓN DE ESTUDIO



Tipos de Climas

-  ECUATORIAL DE ALTA MONTANA
-  ECUATORIAL MESOTERMICO SECO
-  ECUATORIAL MESOTERMICO SEMI-HUMEDO
-  MEGATERMICO LLUVIOSO
-  NIVAL
-  TROPICAL MEGATERMICO HUMEDO
-  TROPICAL MEGATERMICO SECO
-  TROPICAL MEGATERMICO SEMI ARIDO
-  TROPICAL MEGATERMICO SEMI HUMEDO

Figura 15. Regionalización de climas en la zona de estudio.

Adaptado del SIN, datos del MAGAP, 2003

Una vez realizado el enfoque al área de estudio, se puede observar que existe la presencia de seis de los nueve tipos de climas, siendo el clima Tropical Megatérmico semi-árido, Tropical Megatérmico semi-húmedo y el Tropical Megatérmico seco aquellos que no se encuentran presentes en la zona de estudio, ya que este tipo de climas presentan sus distribución geográfica en la región de litoral.

El clima predominante en la zona de estudio es el Ecuatorial de Alta Montaña, el cual se observa que presenta una distribución a lo largo de toda la zona. Seguido del Ecuatorial mesotérmico semi-húmedo y el Tropical megatérmico húmedo el cual tiende de presentarse hacia el este en la zona de estudio.

3.2. Regionalización en la zona de estudio

Temperatura

En el análisis de los datos de las estaciones meteorológicas en la zona de estudio, podemos observar tres tendencias dentro de la evolución de los valores de temperatura en el tiempo.

La primera tendencia observada, que ocurre con mayor frecuencia, se genera en el segundo periodo de estudio se produce un aumento en la temperatura de la zona, mientras que para el último período este valor tiende a decrecer.

Las estaciones con esta característica son:

BAÑOS

IBARRA AEROPUERTO

TULCAN AEROPUERTO

PASTAZA AEROPUERTO

OTAVALO

CAHUASQUI-FAO

PEDRO FERMIN CEVALLOS

QUEROCHACA

El segundo caso corresponde a un continuo aumento en la temperatura durante todos los periodos de estudio, evidenciando significativas variaciones a nivel de los promedios de temperatura.

Las estaciones donde se registra un aumento progresivo en temperatura son: PUYO, donde se observa que desde la década de los 80 a la actualidad se ha producido un aumento de 0.34°C .

IÑAQUITO con una variación final de 0.62°C .

EL ANGEL con variación de 0.53°C .

SAN GABRIEL con variación de 0.45°C .

CAYAPAS con variación de 0.21°C .

Y por último un caso que únicamente se presenta en la estación LATACUNGA AEROPUERTO, donde se observa la disminución de la temperatura a lo largo de todos los periodos de estudio, evidenciando que la variación final existente desde el periodo inicial de estudio hasta la actualidad muestra una disminución de 1.2°C .

La estación que mayor tasa de variación de temperatura presenta durante los periodos de estudio es la estación Ibarra Aeropuerto, donde se observa que en la década de los 80 la temperatura promedio anual era 17.04°C , mientras que a en la actualidad presenta una temperatura promedio de 18.34°C , evidenciando un aumento de 1.3°C durante un periodo de 30 años.

Tabla 7. Regímenes de temperatura para la zona de estudio

| CODIGO | ESTACION | REGIMEN | 1980-1989 | REGIMEN | 1990-1999 | REGIMEN | 2000-2009 | REGIMEN | ULTIMOS 30 AÑOS |
|--------|-----------------------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------------|
| M008 | PUYO | Mesotérmico | 20.9 | Mesotérmico | 21.13 | Mesotérmico | 21.24 | Mesotérmico | 21.077 |
| M024 | IÑAQUITO | Mesotérmico | 14.48 | Mesotérmico | 14.91 | Mesotérmico | 15.15 | Mesotérmico | 14.845 |
| M029 | BAÑOS | Mesotérmico | 17.48 | Mesotérmico | 18.03 | Mesotérmico | 17.75 | Mesotérmico | 17.826 |
| M053 | IBARRA AEROPUERTO | Mesotérmico | 17.04 | Mesotérmico | 18.44 | Mesotérmico | 18.34 | Mesotérmico | 17.938 |
| M055 | QUITO AEROPUERTO-DAC | Mesotérmico | 13.82 | Mesotérmico | 13.77 | Mesotérmico | 13.92 | Mesotérmico | 13.835 |
| M059 | TULCAN AEROPUERTO | Mesotérmico | 12.5 | Mesotérmico | 13.45 | Mesotérmico | 13.2 | Mesotérmico | 13.05 |
| M063 | PASTAZA AEROPUERTO | Mesotérmico | 21.47 | Mesotérmico | 21.87 | Mesotérmico | 21.44 | Mesotérmico | 21.591 |
| M064 | LATACUNGA AEROPUERTO | Mesotérmico | 15.19 | Mesotérmico | 14.76 | Mesotérmico | 14.01 | Mesotérmico | 14.65 |
| M102 | EL ANGEL | Frio | 11.58 | Frio | 11.96 | Frio | 12.11 | Mesotérmico | 11.882 |
| M103 | SAN GABRIEL | Mesotérmico | 12.08 | Mesotérmico | 12.17 | Mesotérmico | 12.53 | Mesotérmico | 12.262 |
| M105 | OTAVALO | Mesotérmico | 14.71 | Mesotérmico | 14.76 | Mesotérmico | 14.7 | Mesotérmico | 14.724 |
| M107 | CAHUASQUI-FAO | Mesotérmico | 16.4 | Mesotérmico | 16.73 | Mesotérmico | 16.69 | Mesotérmico | 16.61 |
| M128 | PEDRO FERMIN CEVALLOS | Mesotérmico | 12.41 | Mesotérmico | 12.69 | Mesotérmico | 12.67 | Mesotérmico | 12.585 |
| M154 | CAYAPAS | Megatérmico | 25.91 | Megatérmico | 26.08 | Megatérmico | 26.12 | Megatérmico | 26.023 |
| M258 | QUEROCHACA | Mesotérmico | 12.53 | Mesotérmico | 12.76 | Mesotérmico | 12.62 | Mesotérmico | 12.662 |

Nota: se presenta la información correspondiente a las variaciones de promedios anuales de temperatura, con el análisis en series de 10 años desde los años 80.

Precipitación

Observando los valores históricos correspondientes a las precipitaciones encontradas en todas las estaciones dentro de la zona de estudio (Tabla 8), la mayor parte de estaciones presenta una mayor tendencia a zonas de tipo semi-húmedo, ya que de las 15 estaciones presentes en la zona de estudio, 10 presentan este tipo de precipitación.

En la mayor parte de las estaciones se observa que en la zona no se presentan variaciones en los valores de precipitaciones que caracterizan a cada una de las zonas donde se encuentran ubicadas, observando que

Puyo, se mantiene lluvioso a lo largo del tiempo.

Iñaquito, húmedo a lo largo del tiempo.

Baños, húmedo a lo largo del tiempo.

Ibarra A, semi-húmedo a lo largo del tiempo.

Pastaza A, lluvioso a lo largo del tiempo.

Latacunga A, semi-húmedo a lo largo del tiempo.

Otavalo, semi-húmedo, a lo largo del tiempo.

Cahuasquí, semi-húmedo a lo largo del tiempo.

Pedro Fermín, semi-húmedo a lo largo del tiempo.

Cayapas, lluvioso a lo largo del tiempo.

Querochaca, semi-húmedo a lo largo del tiempo.

A diferencia de los casos anteriores, dentro de las variaciones observadas dentro de cada una de las estaciones restantes, observamos que se los valores de las precipitaciones son lo suficientemente significativas, como para generar un cambio en las alturas anuales de precipitación, generándose un cambio hacia un nuevo tipo de climas, bajo la nomenclatura planteada por Pourrut, este cambio ocurre en tres estaciones, las cuales son:

- La estación Quito Aeropuerto, donde se puede observar una tendencia de cambio de precipitaciones existentes en un húmedo a precipitaciones correspondientes a un clima semi-húmedo en la última década.

- La estación Tulcán Aeropuerto, donde se presentaba un clima húmedo únicamente en los años 70, y cambia a semi-húmedo a partir de la década de los 80 hasta la actualidad.
- El Ángel, donde se presentaba un clima húmedo en los años 70, el cual presenta un cambio de precipitaciones correspondiente a clima semi-húmedo para la década de los 80, el cual se mantiene hasta la actualidad.
- San Gabriel, que presentaba un clima semi-húmedo en los 70's y 80's, pero presenta un cambio a clima húmedo para la década de los 90, la cual se mantiene hasta la actualidad.

Tabla 8. Regímenes de precipitación para la zona de estudio

| CODIGO | ESTACION | REGIMEN | 1970-1979 | REGIMEN | 1980-1989 | REGIMEN | 1990-1999 | REGIMEN | 2000-2009 | REGIMEN | ULTIMOS 30 AÑOS |
|--------|-----------------------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------------|
| M008 | PUYO | Lluvioso | 4617.3 | Lluvioso | 4592.1 | Lluvioso | 4440.9 | Lluvioso | 4795.8 | Lluvioso | 4609.6 |
| M024 | IÑAQUITO | Húmedo | | | 1063.8 | Húmedo | 1141.2 | Húmedo | 1067.4 | Húmedo | 1090.8 |
| M029 | BAÑOS | Húmedo | 1466.5 | Húmedo | 1479.2 | Húmedo | 1338.1 | Húmedo | 1436.4 | Húmedo | 1417.9 |
| M053 | IBARRA AEROPUERTO | Semi-húmedo | 612.6 | Semi-húmedo | 616.4 | Semi-húmedo | 616 | Semi-húmedo | 628.6 | Semi-húmedo | 620.4 |
| M055 | QUITO AEROPUERTO-DAC | Semi-húmedo | 1018.9 | Húmedo | 1009.4 | Húmedo | 1000.3 | Húmedo | 957.7 | Semi-húmedo | 989.1 |
| M059 | TULCAN AEROPUERTO | Semi-húmedo | 1019.8 | Húmedo | 924.5 | Semi-húmedo | 863.6 | Semi-húmedo | 878.7 | Semi-húmedo | 888.9 |
| M063 | PASTAZA AEROPUERTO | Lluvioso | 5127.4 | Lluvioso | 5550 | Lluvioso | 5396 | Lluvioso | 5307.4 | Lluvioso | 5417.8 |
| M064 | LATACUNGA AEROPUERTO | Semi-húmedo | 535.2 | Semi-húmedo | 498.2 | Semi-húmedo | 584.9 | Semi-húmedo | 548.2 | Semi-húmedo | 543.8 |
| M102 | EL ANGEL | Semi-húmedo | 1167.1 | Húmedo | 933 | Semi-húmedo | 858 | Semi-húmedo | 826.8 | Semi-húmedo | 872.6 |
| M103 | SAN GABRIEL | Semi-húmedo | 847.9 | Semi-húmedo | 983.1 | Semi-húmedo | 1007.6 | Húmedo | 1007.6 | Húmedo | 999.4 |
| M105 | OTAVALO | Semi-húmedo | 839.8 | Semi-húmedo | 888.7 | Semi-húmedo | 865.8 | Semi-húmedo | 894.2 | Semi-húmedo | 882.9 |
| M107 | CAHUASQUI-FAO | Semi-húmedo | | | 669.1 | Semi-húmedo | 696.4 | Semi-húmedo | 718.8 | Semi-húmedo | 694.8 |
| M128 | PEDRO FERMIN CEVALLOS | Semi-húmedo | | | 517.6 | Semi-húmedo | 507.8 | Semi-húmedo | 543.8 | Semi-húmedo | 523.1 |
| M154 | CAYAPAS | Lluvioso | 3395.7 | Lluvioso | 3137 | Lluvioso | 3032.4 | Lluvioso | 3685.9 | Lluvioso | 3285.1 |
| M258 | QUEROCHACA | Semi-húmedo | | | 592.9 | Semi-húmedo | 574.9 | Semi-húmedo | 618.6 | Semi-húmedo | 595.5 |

Nota: se presenta el análisis de las precipitaciones observando las variaciones existentes para cada estación, desde la década de los 80, analizados en series de tiempo de 10 años para las últimas 30 décadas.

Régimen de llluvias

Para realizar este análisis se trabajó con los datos correspondientes al registro histórico de información provenientes del INAMHI, de los cuales se analizaron los valores correspondientes a los datos de precipitación en cada una de las estaciones dentro de la zona de estudio.

Para este punto se analizan los máximos y mínimos pluviométricos representados a lo largo del año mediante los promedios para cada mes con toda la información presente en cada estación, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 7. Regímenes de precipitación para las estaciones meteorológicas en la zona de estudio

| | |
|----------------------|-------------------------------------|
| Puyo | Subtropical |
| Quito-INAMHI | Ecuatorial |
| Baños | Tropical |
| Ibarra Aeropuerto | Ecuatorial |
| Quito Aeropuerto | Ecuatorial |
| Tulcán Aeropuerto | Ecuatorial con tendencia a Uniforme |
| Pastaza Aeropuerto | Subtropical |
| Latacunga Aeropuerto | Ecuatorial |
| El Ángel | Ecuatorial |
| San Gabriel | Ecuatorial con tendencia a Uniforme |
| Otavalo | Ecuatorial |
| Cahuasqui | Ecuatorial |
| Pedro Fermín | Ecuatorial con tendencia a Uniforme |
| Cayapas | Tropical |
| Querochaca | Tropical con tendencia a Uniforme |

Nota: La representación gráfica de los regímenes de precipitación se encuentra en la sección de anexos.

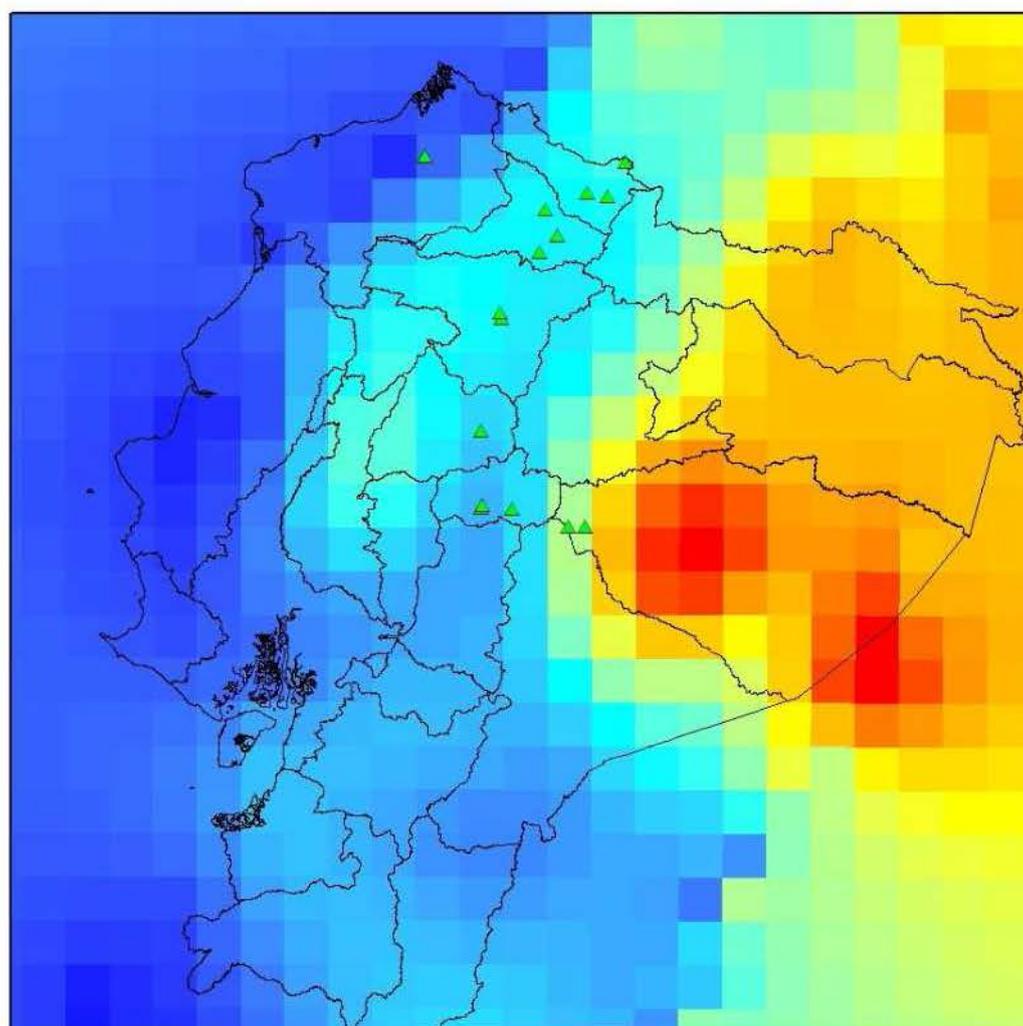
3.3. Determinación del modelo aplicable para la zona de estudio

Thomas Lingerfjärd define a los modelos matemáticos como un proceso matemático que implica la observación de un fenómeno, la generación de conjeturas, la aplicación de análisis matemático (ecuaciones, estructuras simbólicas, etc.) la obtención de resultados matemáticos, y la reinterpretación del modelo (Lingerfjärd, 2006, p. 1).

Como se presentó en el capítulo 1, se busca determinar la aplicabilidad de los modelos regionales para la zona de estudio, por lo tanto es necesario presentar los resultados obtenidos por los modelos regionales a nivel del Ecuador, para observar el nivel de detalle existente y proceder al avance a la región de estudio.

En primer lugar se analiza la aplicación de un modelo regional con escala horizontal de 50km, con el objetivo de determinar si las escalas de trabajo planteadas por estos modelos resultan descriptivas a un nivel aceptable en términos gráficos para determinar las variaciones tanto de precipitación como temperatura en la zona de estudio.

Posteriormente se analiza el mapa de temperatura generado mediante los datos obtenidos del modelo regional PRECIS, trabajando con una escala horizontal de 25 km, aumentando el nivel de detalle gráfico de las variaciones existentes para las variables de estudio.



Precipitaciones

Value

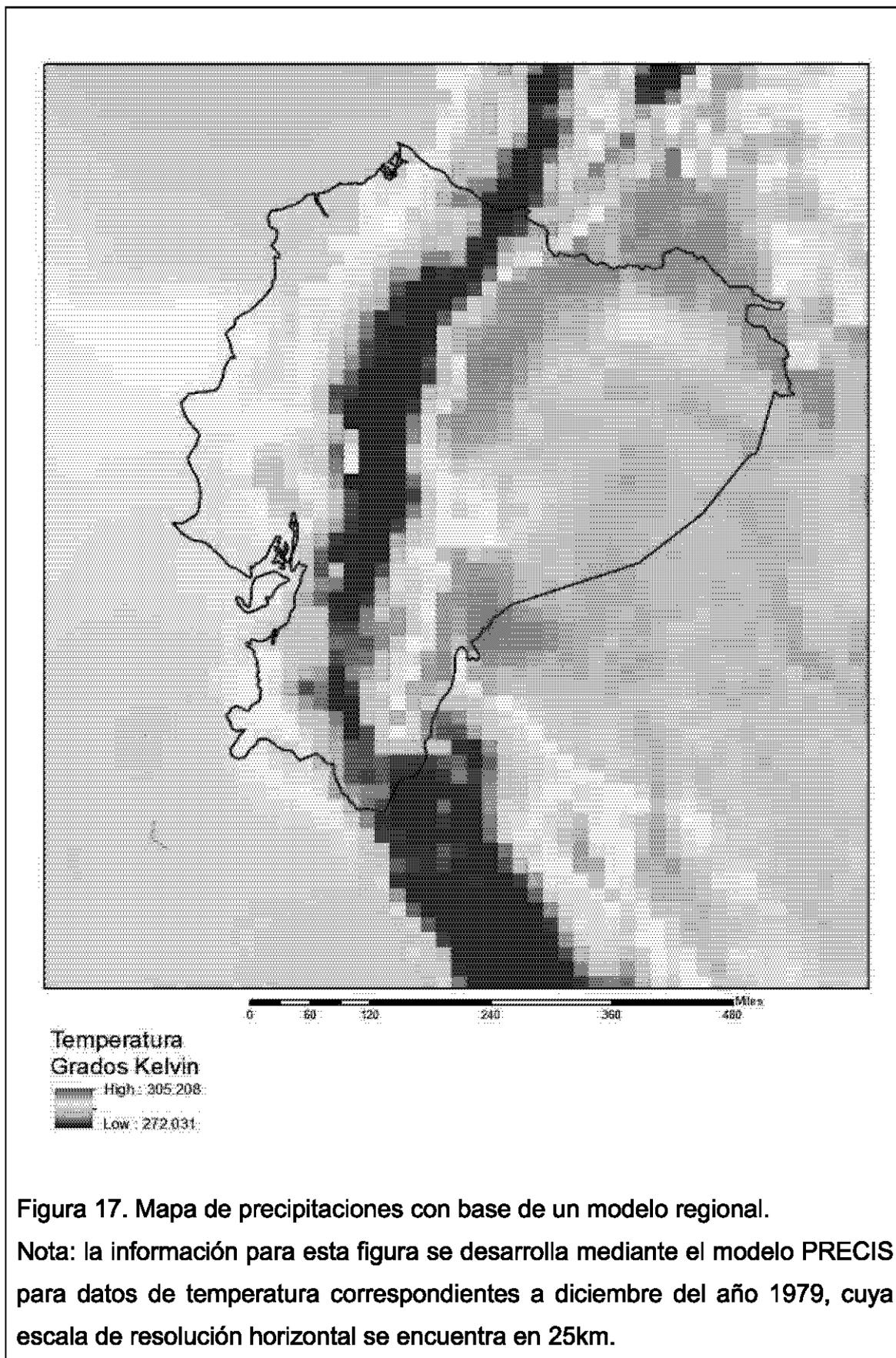
High : 20.7026

Low : 0.0666667

▲ Estaciones Meteorológicas

Figura 16. Mapa de precipitaciones con base de modelo regional.

Nota: modelo regional, con escala de resolución horizontal de 50km. Se muestra la representación de precipitaciones para el día 15 de diciembre del año 1999 a las 22:00.



De los dos mapas representativos de los modelos climáticos regionales, se observa que si bien pueden describir la realidad existente para variables como la precipitación y temperatura del Ecuador, al enfocar esta información a la zona de estudio, el detalle de la información debido a la escala de resolución, a pesar de ser sumamente baja (25km) se mantiene por encima de los requerimientos para analizar la zona de estudio.

Como se menciona en el capítulo 1.8, basado en las condiciones geográficas de la zona de estudio y debido a los requerimientos gráficos dimensionales buscados por parte de los modelos climáticos, se requiere métodos con mayor nivel de detalle mediante la utilización de modelos estadísticos para la obtención de los resultados deseados.

De los métodos estadísticos de interpolaciones presentados en el capítulo 1, aquellos con mejores resultados para este tipo de trabajo son el IDW y el Kriging.

Algunos estudios demuestran que la metodología Kriging presenta mejores resultados que el IDW, a pesar de no existir variaciones considerablemente significativas entre ellos, siendo una de las ventajas que “el Kriging proporciona un análisis más elaborado y con un fundamento estadístico” (Villatoro, Henríquez, y Sancho, 2008, pág. 105).

3.3.1. Aplicación del modelo matemático

R es un entorno computacional que trabaja con un lenguaje de programación destinado al análisis estadístico. R proporciona una amplia variedad de técnicas gráficas estadísticas como el análisis de series de tiempo lineales y no lineales, pruebas estadísticas clásicas, trabajo con clústeres entre otros, teniendo un alto espectro de acción (CRAN, 2014).

Dentro del lenguaje de programación R, se encuentra un modelo matemático desarrollado por Emanuele Cordano en diciembre del 2012, el cual fue diseñado con el objetivo de encontrar las relaciones existentes entre las variaciones climáticas y los procesos de agricultura en las regiones alpinas de Italia, incluyendo la necesidad de generar series de datos para valores de precipitación y temperatura, todo dentro de la plataforma de trabajo R, permitiendo desarrollar el proceso de reducción de escala de los MCG a varias zonas en Trentino, Italia (Cordano, Eccel, 2012, p.1).

De esta manera se considera apropiada la aplicación de este modelo para el presente estudio, ya que la base de datos del INAMHI proporciona información consistente con las variables presentadas dentro del modelo de Emanuele Cordano desarrollado en la plataforma de lenguaje de programación R, bajo el planteamiento del modelo denominado RMAWGEN.

La plataforma de trabajo en la cual se desarrolla el análisis estadístico para el presente estudio se realiza en el software denominado R-Studio, el cual es una variación más amigable para el usuario del lenguaje R que presenta una ventana como se muestra en la sección de Anexos.

- **Acoplamiento del modelo RMAWGEN a la zona de estudio:**

Para adaptar el modelo mencionado anteriormente a la zona de estudio se procede a trabajar con los valores diarios de temperatura correspondientes a dos estaciones meteorológicas en un período de estudio de 30 años, ajustando la serie de datos que plantea el modelo de Emanuele Cordano mediante el reemplazo de los valores de la base de datos del modelo (correspondientes a Italia), por los datos de las estaciones meteorológicas del INAMHI.

De esta manera se procede a la correr el modelo mediante la determinación de las estaciones de trabajo para el RMAWGEN, donde se establecen valores a considerar dentro de las series de tiempo predeterminadas durante la programación del modelo. Una vez establecidos dichos valores se realiza el

proceso de Gaussianización de los datos con el fin de reducir la dimensionalidad mediante la explotación de la independencia de las estructuras presentes en los datos (Chen y Gopinath, 2001, p.1).

Posteriormente se realiza un análisis de varianza de los datos establecidos dentro de las estaciones y el periodo de tiempo determinado, seguido de un análisis de normalidad y una prueba de errores correlacionados en la serie. Una vez realizados estos análisis estadísticos, se procede a la generación de los valores diarios para las estaciones establecidas, permitiendo determinar la correlación existente entre los valores observados e introducidos en el modelo, con lo valores generados mediante el mismo.

Bajo esta premisa se procede a la elaboración de tablas comparativas para la función de autocorrelación para los valores generados como se presenta en la sección de Anexos, para la temperatura máxima, la temperatura mínima y la variación delta generada.

Mediante la elaboración de estas tablas se determina la existencia de una serie de datos no estacionaria, ya que en los casos donde las series de tiempo son estacionarias, los valores presentados mediante la función ACF disminuyen inmediatamente después del valor inicial 1 y se mantienen en valores cercanos a 0, mientras que en el caso de las series no estacionarias, la disminución de valores desde 1 a 0 se presentan con un decrecimiento gradual y se evidencian a lo largo de periodo de tiempo prolongado (Petzoldt, 2013, pp 85-87).

3.3.2. Aplicación del método Kriging

Para poder aplicar el método de interpolación que permita ajustar de mejor manera la base de datos establecida con la información proveniente de las estaciones meteorológicas seleccionadas en la zona de estudio, se analizan los dos métodos presentados anteriormente.

La finalidad de cada uno, consiste en realizar una predicción basada en el conocimiento de un valor en un punto determinado Z (para el presente estudio corresponde a los valores de precipitación y temperatura), los cuales reciben una ponderación, y son sometidos a la fórmula matemática que se presenta a continuación (ESRI, 2012):

$$\hat{Z}(S_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(S_i) \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

$Z(s_i)$ = el valor medido en la ubicación i

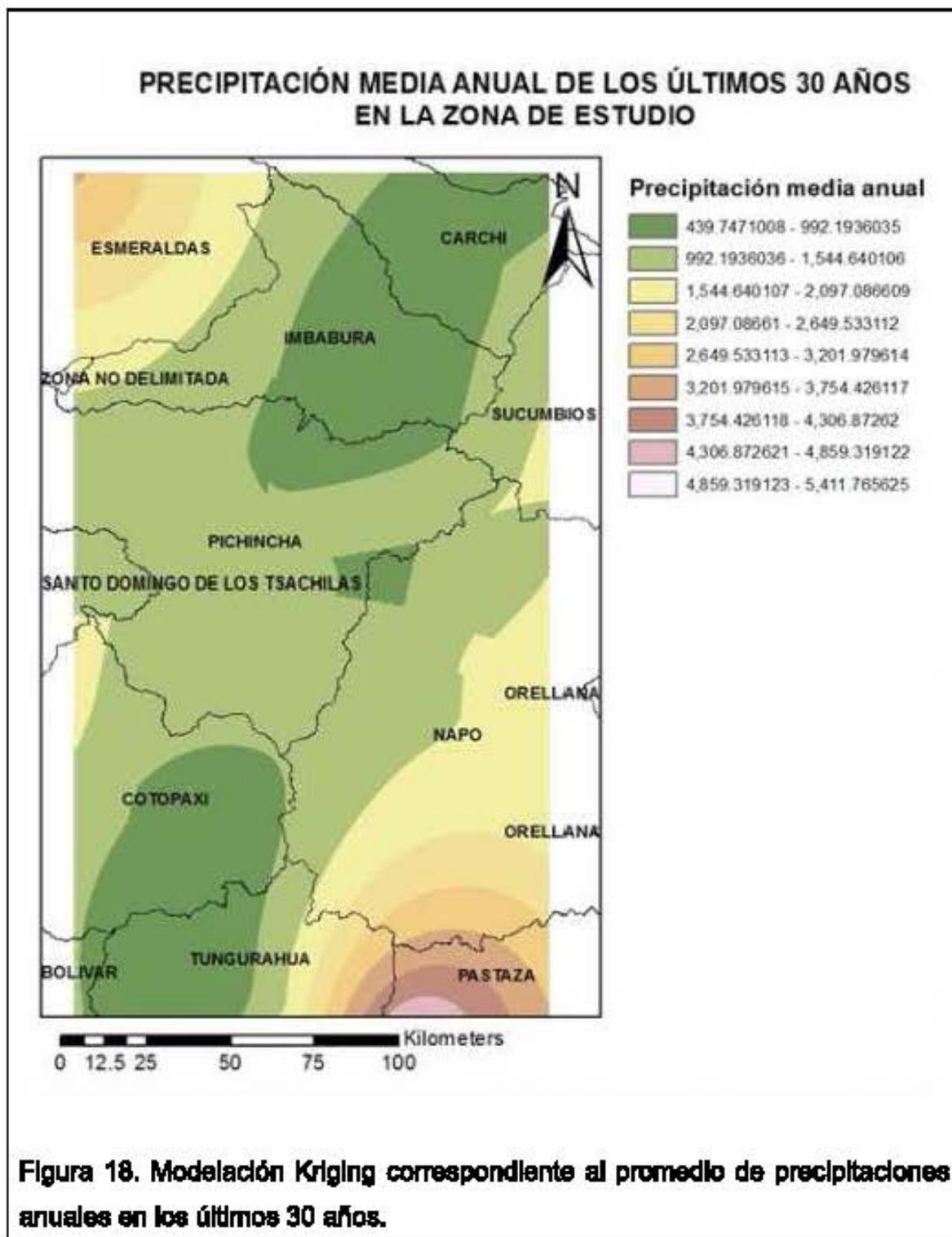
λ_i = una ponderación desconocida para el valor medido en la ubicación i (el peso dado al valor observado)

s_0 = la ubicación de la predicción

n = la cantidad de valores medidos (# observaciones)

Se aplicaron las metodologías de interpolación IDW y Kriging, donde se analizaron los resultados presentados, siendo muy similares en cuanto a los valores estimados referentes a la temperatura, observando que existe una diferencia significativa al analizar los valores de precipitación, existiendo una variación de casi 100mm por encima de los valores mínimos existentes en la base de datos para el estudio por parte del IDW.

Por esta razón se descarta la utilización de la metodología de interpolación IDW, para trabajar en el desarrollo de la información con la metodología Kriging, cuyos resultados se acercan mejor a la realidad existente. Los resultados de la aplicación de dicho modelo se observan a continuación:



4. Escenarios

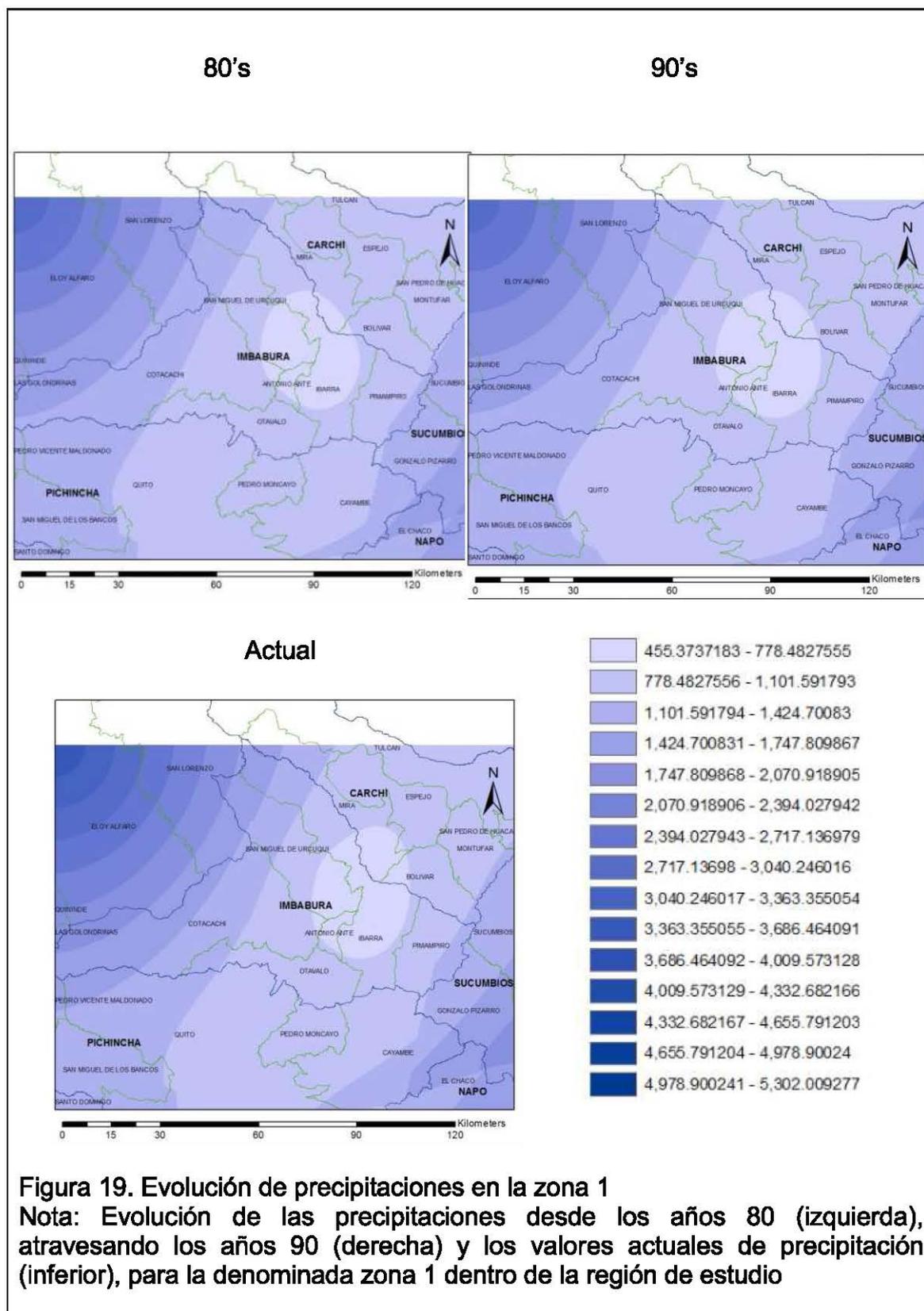
4.1. Escenarios agrupados en el tiempo representados mediante mapas temáticos históricos en SIG

En el capítulo anterior se define la aplicación del modelo estadístico para desarrollo de los mapas y escenarios en la zona de estudio, es así que se procede a presentar cada una de las subregiones definidas para la zona de estudio, con la representación gráfica de la evolución tanto de las precipitaciones como las temperaturas con los datos provenientes de las estaciones meteorológicas definidas en el capítulo 2.

En primera instancia se analizan los mapas elaborados con los modelos estadísticos con la información correspondiente a los valores de precipitación para las 3 regiones en la zona de estudio, para proceder posteriormente con el análisis de la temperatura.

Para cada una de las zonas de estudio se analizan los escenarios generados con los valores de las precipitaciones medias anuales correspondientes en cada uno de los periodos de estudio propuestos (década de los 80, década de los 90, y valores posteriores al año 2000), generand otros mapas para cada una de las etapas de análisis y tres mapas para cada una de las regiones de estudio.

El objetivo de este análisis permite comprender el comportamiento de las precipitaciones y las temperaturas en la zona de estudio, para encontrar la relación existente entre el aumento de las temperaturas con la cantidad total de precipitación en la zona de estudio y finalmente poder determinar la tendencia de dichos factores, concluyendo con la elaboración de los futuros escenarios a generarse en la zona de estudio.



De los 80's a los 90's

Para los años 80, el centro focal de bajas precipitaciones abarca un área de aproximadamente 850km² entre los cantones de Mira, Bolívar, Ibarra, Antonio Ante y San Miguel de Urququí. Para los años 90, este frente presenta un expansión de aproximadamente 5km radiales desde el centro focal en todas direcciones, lo cual determina una disminución de las precipitaciones dentro de los cantones mencionados.

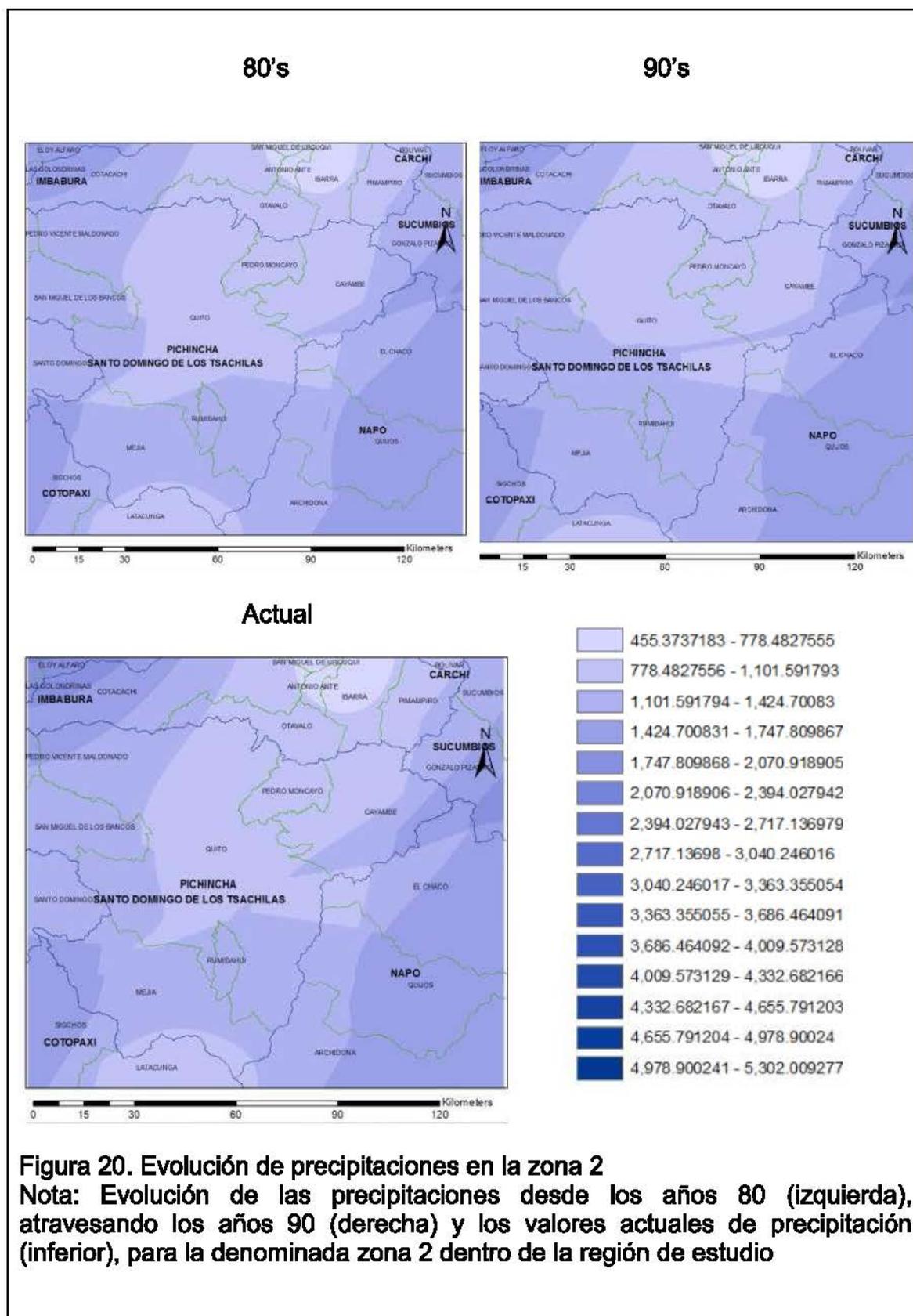
La zona oeste de Cotacachi presenta una ligera disminución en precipitaciones con el retroceso de la franja de precipitaciones entre 1400 y 1700 mm.

La tendencia general hacia los años 90 presenta una reducción de precipitaciones a nivel general dentro de la zona 1.

De los 90's a la actualidad

La tendencia general de reducción de precipitaciones al oeste de Cotacachi observada durante los años 90 se invierte de manera significativa, observando la aparición de nuevos frentes de precipitaciones que implican un aumento considerable de precipitaciones en la zona, donde se llegan a presentar franjas con precipitaciones hasta 2400mm anuales tanto en Cotacachi como San Miguel de Urququí. A su vez se observa la aparición de sectores que presentan hasta 2000mm anuales de precipitación al norte de Ibarra, y al oeste de Mira.

Mientras que se observa el continuo avance de la tendencia de disminución de precipitaciones al sur de Mira y al oeste Bolívar, donde se evidencia el avance del frente de bajas precipitaciones. La tendencia general hasta la actualidad evidencia un considerable incremento de precipitaciones en la sección oeste de la zona 1, mientras se evidencia la continua reducción de precipitaciones con el aumento del frente de bajas precipitaciones en la zona central.



De los 80's a los 90's

Para los años 90 se observa un considerable aumento de las precipitaciones, principalmente en toda la zona central de Pichincha en un área aproximada de 700km². Así como un avance en el sur del cantón Mejía hasta la zona de Latacunga.

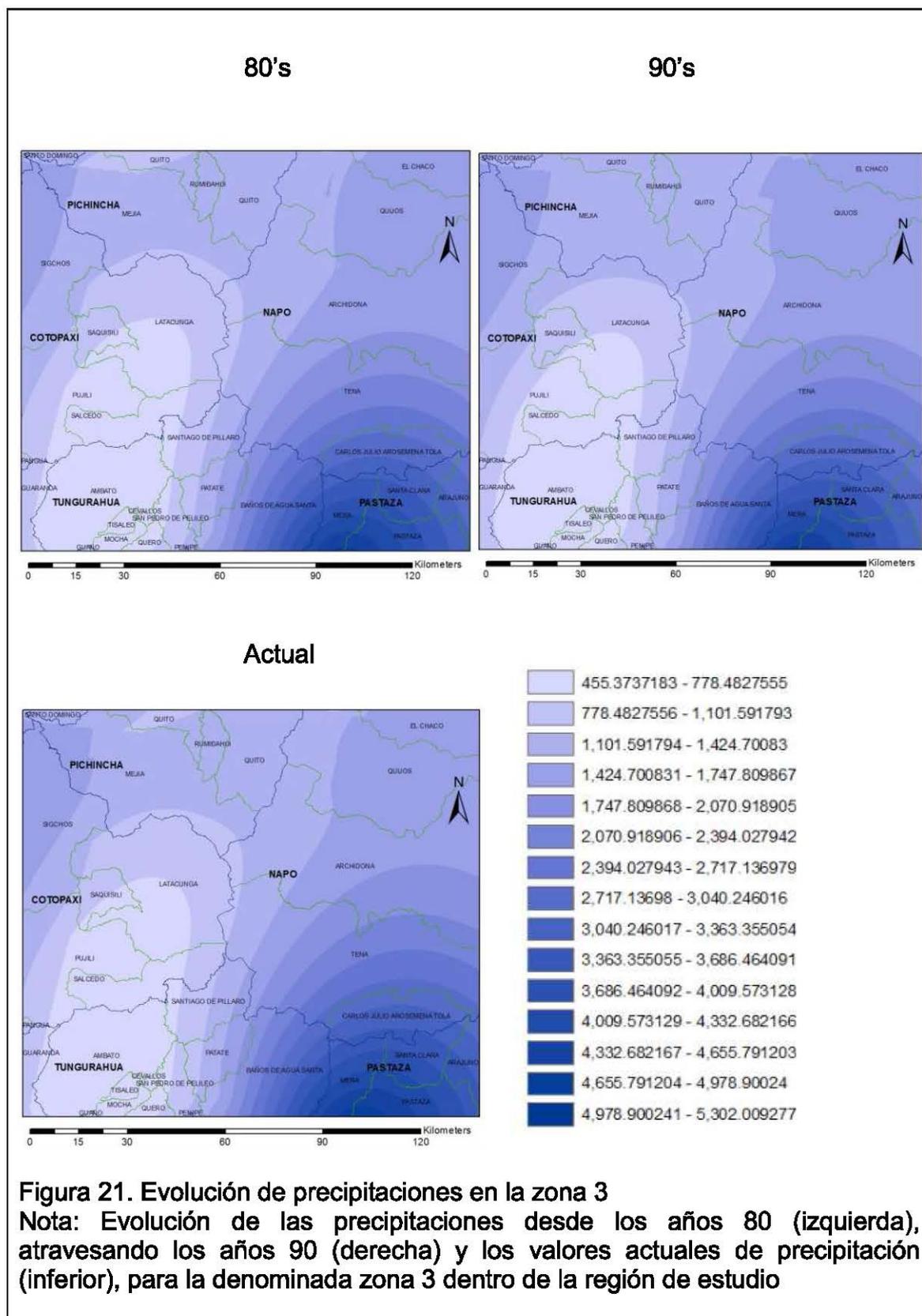
De igual manera se evidencia el incremento de precipitaciones al oeste de Mejía, donde se presenta una franja de aproximadamente 100km² con incremento de 300mm de precipitación anual. La tendencia para este periodo de análisis demuestra un significativo incremento de precipitaciones tanto en la zona central como al sur de Quito.

De los 90's a la actualidad

Esta tendencia de incremento de precipitaciones no se mantiene de los años 90 a la actualidad, al observar que para la actualidad los valores de precipitación son muy similares a los observados en los años 80, por lo tanto la variación el cambio entre décadas presenta la disminución de precipitación en toda la zona central.

De igual manera a lo observado en la zona 1, el incremento de precipitaciones más evidente proviene desde el este, donde existe un avance del frente de precipitaciones entre 1400 a 1700 mm en la zona noroeste de Pedro Vicente con un avance de aproximadamente 15km radiales, cubriendo aproximadamente 190km² en Pedro Vicente y 270km² al oeste de Quito.

La tendencia de este periodo de estudio muestra un incremento de precipitaciones para la zona noroccidental, y una reducción en la zona central y al sur.



De los 80's a los 90's

En el análisis de esta zona, observando las variaciones desde la época de los 80 a la época de los 90, demuestra que existe un aumento en las precipitaciones hacia la zona central de Latacunga desde el norte, existiendo un avance del frente de precipitaciones entre 1100 y 1400mm en la frontera con Mejía y un avance del frente entre 780 y 1100mm hacia el centro de Latacunga. De igual manera se evidencia un ligero incremento en la zona oriental.

Se observa una disminución de precipitaciones en Pelileo, Patate y Píllaro pero la zona de afectación de este cambio es mínima.

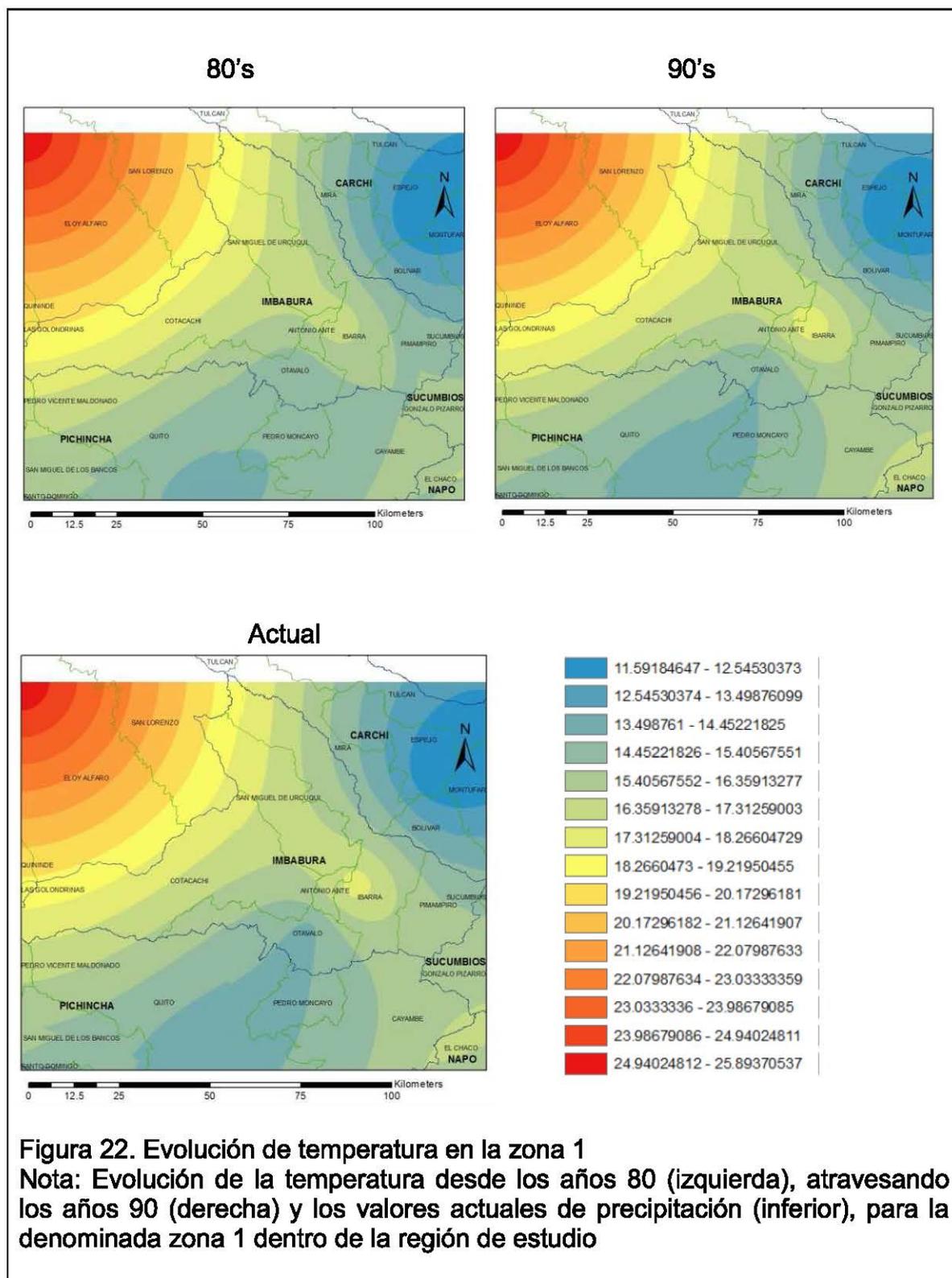
La tendencia evidencia un incremento de precipitaciones por medio del avance de los frentes lluviosos desde el norte y desde el oeste.

De los 90's a la actualidad

De la década de los 90 el proceso de aumento de precipitaciones se invierte, retornando a condiciones similares a la década de los 80, donde nuevamente el frente de precipitaciones bajas entre 700 y 1000mm se expande hacia la zona norte de Latacunga hasta llegar a Mejía en un área total cercana a 400km².

El avance del frente de precipitaciones bajas entre 400 y 700mm se evidencia en un área cercana a 230km² a lo largo de Pujilí, Latacunga y Saquisilí. Los demás cantones dentro de la zona 3 no presentan mayores cambios en los frentes de precipitaciones.

La tendencia de esta época de estudio muestra un retorno a condiciones de precipitación similares a la década de los 80.



De los 80's a los 90's

Las variaciones desde la década de los 80, muestra una disminución del frente de temperatura más bajo en la noreste de la zona.

Así como la variación general en casi todo el cantón de Pimampiro, al igual que la zona norte de Cayambe, la zona oeste de Otavalo, el oeste de Pedro Moncayo, y la zona nororiental de Quito presentan una disminución de las temperaturas.

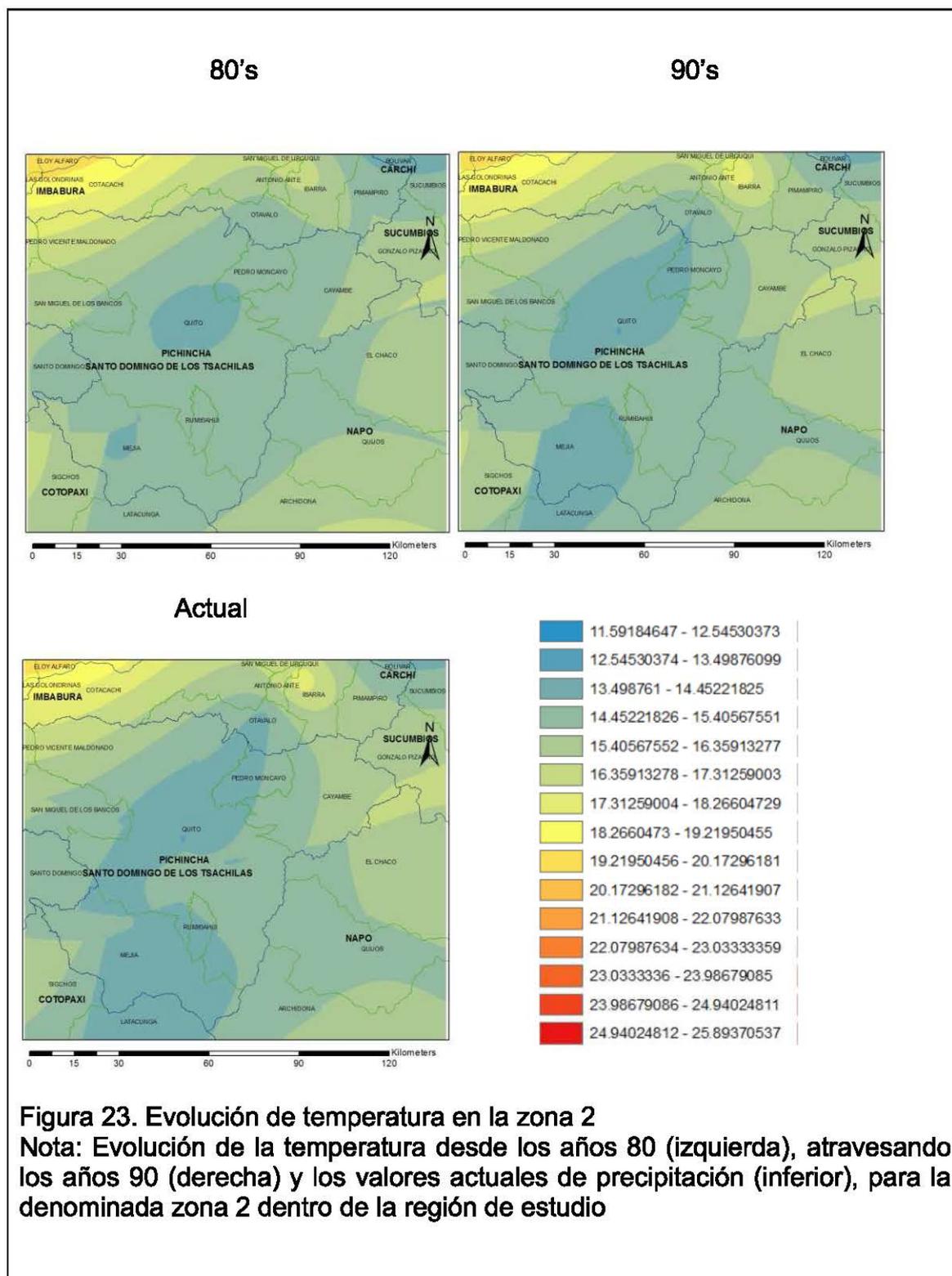
La mayor variación se observa en la zona límite fronteriza entre Antonio Ante e Ibarra, donde se genera un centro focal de con aumento de temperatura en 1°C, en una zona de aproximadamente 80km².

De los 90's a la actualidad

Desde la década de los 90, se observa que los cambios más significativos ocurren dentro de Otavalo, donde la temperatura se reduce un 1 grado en un área cercana a 70km² desde la parte central. A su vez la zona caliente existente entre Antonio Ante e Ibarra se reduce ligeramente.

Las variaciones en los demás cantones son mínimas en cuanto al avance de los diversos frentes de temperatura.

La tendencia general en los mapas que muestran la evolución de las temperaturas presentan claramente la tendencia al aumento de las temperaturas en la parte norte de la zona 1, observado mediante el avance de frentes de temperatura más caliente, así como una disminución de temperaturas en la parte sur con su centro focal siendo Otavalo.



De los 80's a los 90's

Para la década de los 80, el centro focal frío se encuentra en la zona central de Quito y la zona límite con Pedro Moncayo en un total área cercana a 540km², y al sur en un área de aproximadamente 90 km² en el cantón Mejía.

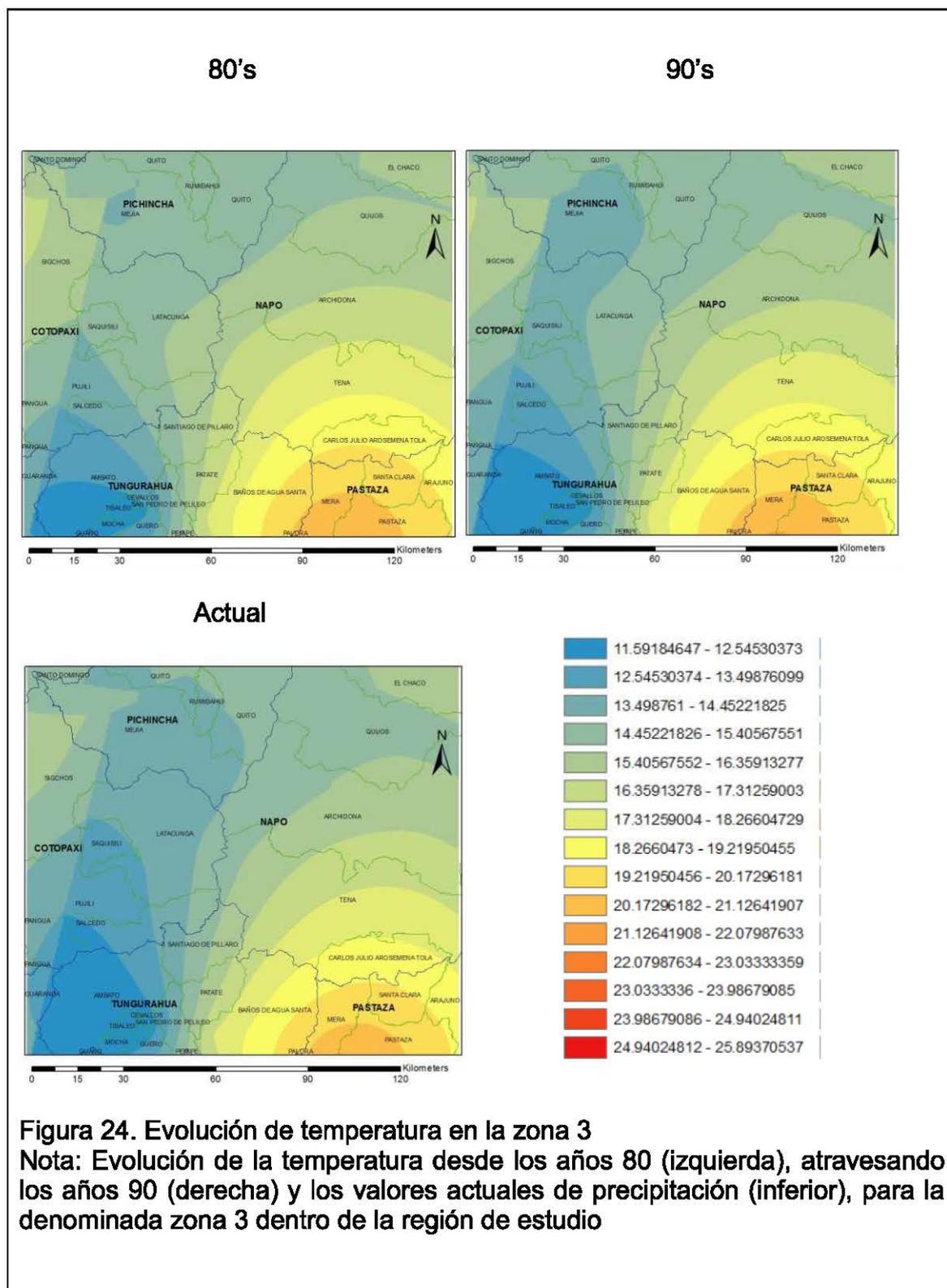
Los gráficos claramente presentan la tendencia general dentro de la zona 2, la cual muestra notablemente la reducción de temperatura en a lo largo de la zona, siendo los cambios más significativos los ubicados a lo largo de Quito, Rumiñahui y Mejía. La disminución de temperatura llega a expandirse hasta llegar a la zona limítrofe de Quito al este con Cayambe al oeste con San Miguel de los Bancos, avanzando hacia el norte hasta llegar a Otavalo, obteniendo una nueva área de presencia de temperatura de baja cercana a 1300km²,

La zona de temperatura baja al sur aumenta hasta llegar a un área total aproximada de 800km² cubriendo una parte del sur de Quito, y parte de Rumiñahi, expandiéndose en todo el sur del canton Mejía hasta llegar al limite con Latacunga.

El único cantón que muestra un comportamiento diferente es Cayambe, donde el avance de los frentes de temperatura es inverso al resto de la zona, es decir que desde la década de los 80, la temperatura ha aumentado en el cantón, esto se observa con la disminución del frente de 12.5° hacia el oeste en un área aproximada de 360km².

De los 90's a la actualidad

La tendencia de disminución de temperaturas continúa hasta la actualidad, donde se observa una expansión de 300km² en la zona central de Quito y 440km² hacia el sur en el canton Mejía y Rumiñahui.



De las 3 zonas de análisis, la zona 3 presenta el comportamiento más constante en términos de evolución de temperatura, ya que en la mayor parte de zona se mantiene la tendencia de disminución de temperatura a lo largo del periodo de estudio, con el constante avance de los frentes fríos hacia el norte.

De los 80's a los 90's

El principal cambio que se observa es la disminución de la temperatura en la parte sur de la zona, donde se produce un avance del frente de temperatura entre 13° y 14° grados hacia el norte, avanzando por Saquisilí hasta llegar al norte a Latacunga y al este al inicio de Píllaro.

De igual manera disminución de temperaturas al este donde se evidencia el avance del frente de 14° a 15° desde el sur de Sigchos hacia el norte. El mismo frente presenta un avance hacia el este de Latacunga, llegando hasta la zona central de Latacunga.

El frente más frío entre 11° y 12° también presenta un avance hacia el norte extendiéndose desde Ambato hacia el límite con Guaranda.

De los 90's a la actualidad

Todos los frentes que presentaron variaciones hasta la década de los 90 mantienen su tendencia, generando avances hacia el norte.

Aumenta ligeramente la tasa de avance de los frentes fríos en el sur hacia el oriente.

La única variación en la zona se observa en la zona de Sigchos, donde se invierte el proceso y se genera un aumento de temperatura desde el este, donde avanza el frente entre 16° y 17°.

4.2. Generación de los mapas temáticos predictivos en SIG basado en el análisis de las tendencias

Para la generación de los mapas de predicción de escenarios a futuro para la tendencia de precipitaciones y temperatura se trabaja con la información presente de la base de datos del INAMHI que brinda los históricos de promedios para cada una de las variables a ser analizadas mediante los valores disponibles en cada una de las estaciones localizadas en la zona de estudio.

Por medio de la agrupación de los valores de precipitación y temperatura en periodos de estudio (10 años cada grupo de valores), se establece las variaciones entre cada una de las décadas de análisis, lo cual permite determinar el índice de variación.

De esta manera se aplica el índice de variación a los valores actuales de precipitación y temperatura, para encontrar la proyección a futuro para las variables (precipitación y temperatura) agrupadas en el tiempo.

Por medio de estas proyecciones para cada una de las estaciones dentro de la zona de estudio se presentan nuevos valores que se someten al mismo proceso de elaboración de mapas utilizado en el capítulo 4.2, mediante la herramienta de modelación estadística Kriging.

Así las predicciones obtenidas se plantean para el 2030 y para el 2050 las cuales se analizan tanto para la precipitación como para la temperatura en la figura 25 y figura 26 respectivamente.

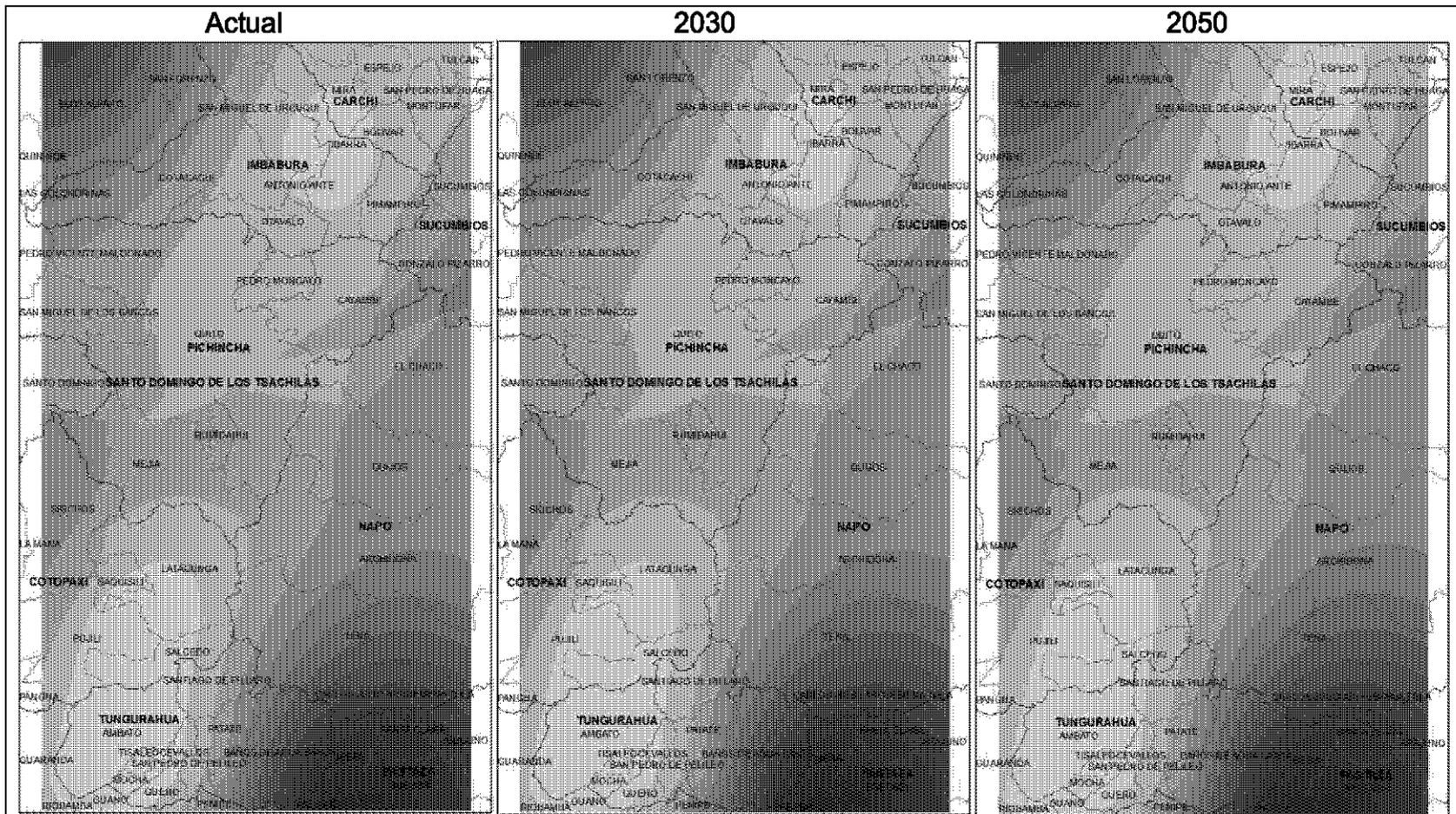


Figura 25. Mapas predictivos de precipitaciones para la región sierra norte del Ecuador:
 Nota: se muestra las precipitaciones en la actualidad (izquierda), la proyección para el 2030 (centro) y la predicción para el 2050 (derecha)

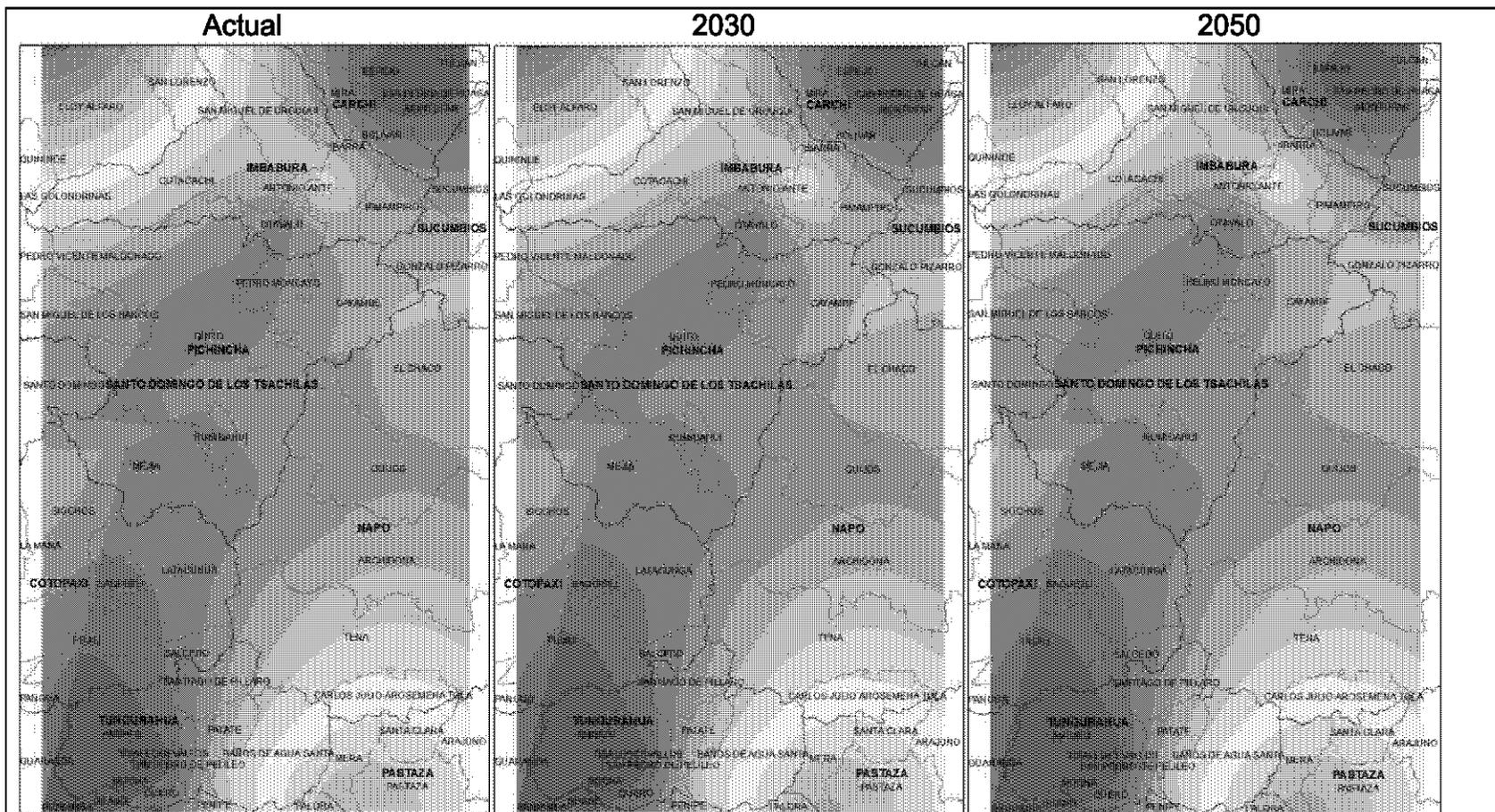


Figura 26. Mapas predictivos de temperatura para la región sierra norte del Ecuador:
Nota: se muestra las precipitaciones en la actualidad (izquierda), la proyección para el 2030 (centro) y la predicción para el 2050 (derecha)

4.3. Análisis de resultados predictivos

4.3.1. Precipitación

Actualidad al 2030

Reducción de precipitaciones hacia el norte de Mira, Bolívar y Espejo en un área aproximada de 400km².

Reducción de las precipitaciones al este de Quito y en la zona limítrofe con San Miguel de los Bancos.

Decrecimiento de las precipitaciones al sur del canton Mejía, donde se observa el avance radial del frente de precipitaciones en aproximadamente 1km.

Incremento en las precipitaciones en la zona noroeste, donde los frentes de precipitaciones avanzan radialmente en aproximadamente 1km.

2030 al 2050

Las tendencias hasta el 2050 se mantienen en los mismos centros focales, donde se observa la continua reducción de precipitaciones hacia el norte y este del catón Espejo. De igual manera se continúan produciendo la reducción de precipitaciones hacia el este de Quito y San Miguel de los Bancos.

Disminuye el avance de los frentes de altas precipitaciones, consecuentemente el incremento de precipitaciones en la zona noroeste se reduce significativamente.

4.3.2. Temperatura

Actualidad al 2030

Aumento de temperatura hacia el norte en un área de aproximadamente 40km² entre Tulcán y San Pedro de Huaca

Aparición de un pequeño centro con mayor temperatura en el área de Ibarra de 3km² aproximadamente.

Disminución de temperaturas hacia el noreste, evidenciado mediante el avance de los frentes fríos con un promedio de 4km radiales.

El avance en la zona 1 se incrementa considerablemente hacia el este, produciéndose un descenso en las temperaturas en Quito y San Miguel de los bancos hacia Pedro Vicente Maldonado y desde Quito hacia Cayambe.

La zona 3 presenta el mismo comportamiento desde el este, con la constante disminución de temperaturas del oeste al norte, mientras que lo opuesto se observa de este a norte, donde el proceso es inverso, es decir que el centro focal de temperaturas cálidas provenientes desde el oriente presenta un avance.

2030 al 2050

El proceso observado hasta el 2030 se mantiene hacia el 2050, observando el avance de los frentes fríos hacia el oeste, mientras que el centro frío con centro en Espejo y Montúfar continúa disminuyendo su área de efecto, correspondientemente existiendo un aumento de temperatura en estos cantones.

La zona focal de aumento de temperatura en Ibarra incrementa su área, existiendo una nueva zona de aproximadamente 25km² donde aumenta la temperatura.

Como centro caliente generado en Ibarra, se observa que existe un avance de cada uno de los frentes calientes en la zona, cuyo principal avance se produce hacia el sureste con un área aproximada de avance de 180km², donde se observa que Pimampiro es el área con mayor incidencia del cambio.

Al sur de Quito y Rumiñahui se observa un aumento de temperaturas en un área significativa, produciéndose el inverso de variación producido hasta el 2030.

5. Conclusiones y Recomendaciones

5.1. Conclusiones

1. Los modelos climáticos cuyo objetivo primordial se enfoca en la elaboración de escenarios de cambio climático, entre los cuales se encuentran: modelos globales, modelos regionales y modelos estadísticos de regionalización de climas, son diversos y varían con las escalas de resolución con las cuales trabajan. Los modelos globales son los que menor escala de resolución tienen y resultan ser los menos apropiados para escenarios destinados a pequeñas regiones de estudio. Para los modelos que abarcan todo el territorio del Ecuador, se determina que aquellos con mayor grado de aceptación son el ETA, el TL959 y el PRECIS, pero en caso de requerir información de carácter provincial e incluso escalas inferiores, es necesario trabajar con modelos estadísticos para desarrollar de manera detallada las variables de estudio planteadas.
2. Dentro de los métodos de interpolación para variables climáticas, los modelos más utilizados dentro de los sistemas de información geográfica, son: el Método de la distancia inversa (IDW) y el método de interpolación Kriging, que plantean la obtención de mapas gráficos detallando las predicciones obtenidas, mediante la utilización de fórmulas matemáticas que realizan representaciones de los datos de muestra basados en coeficientes de ponderación. Todo esto para determinar los comportamientos espaciales de la variable analizada.
3. De las propuestas de modelos de generación de escenarios de cambio climático, se observa que para la distribución total del territorio ecuatoriano, los modelos regionales presentan un acercamiento considerablemente cercano a la realidad existente, para las variables climáticas ya que trabaja con escalas horizontales de hasta 25 km.

Mientras que se observa que los estudios a escalas provinciales requieren un mayor acercamiento por parte de los modelos, lo cual se obtiene mediante la utilización de modelos estadísticos de regionalización.

4. Mediante los resultados presentados por el modelo matemático de Emanuele Cordano, donde se demuestra la carencia de estacionariedad en la serie de datos meteorológicos utilizados en el presente estudio, se evidencia la complejidad existente en los análisis climáticos. Estos buscan determinar el comportamiento del clima a lo largo del tiempo, ya que implican innumerables factores que repercuten, de manera directa, en las variaciones climatológicas. Se puede observar que durante el análisis de la temperatura, se constata que el comportamiento de este factor climatológico se encuentra ligado a una serie de variables afectadas de manera directa por las condiciones particulares presentes durante el día. Dichas condiciones repercuten directamente sobre los valores registrados por las estaciones meteorológicas, por lo cual, los datos medidos representan un acercamiento a su verdadero comportamiento, resultando casi imposible el poder predecir de manera objetiva el direccionamiento de las variaciones de temperatura a futuro.

5. Dentro de las metodologías de interpolación que fueron probadas dentro del estudio, los modelos con mejores resultados para las interpolaciones de los datos obtenidos de los registros históricos del INAMHI, fueron el IDW y la modelación Kriging. De estos modelos, se pudo observar que el IDW presenta resultados por encima de los valores máximos y mínimos de precipitación, lo cual es poco apropiado para el análisis de los escenarios a futuro. Por esta razón, el modelo Kriging fue el seleccionado para el desarrollo de la propuesta de escenarios de precipitación, al presentar valores más cercanos a los datos reales en la zona de estudio; mientras que ambos modelos presentaron datos muy similares al interpolar los valores de temperatura, por esto se decidió

mantener al modelo Kriging como modelo común para las dos variables estudiadas.

6. La tendencia general para los valores de precipitación dentro de la zona de estudio muestra la reducción considerable en la parte norte, desde el centro de Ibarra hasta Espejo, siendo este el centro que mayor nivel de afectación presenta por las variaciones del clima. De igual manera, pero en menor medida, se observa la reducción de precipitaciones desde el centro de Quito hacia San Miguel de los Bancos, y desde el norte de Latacunga hasta la zona sur de Mejía.
7. La tendencia para los valores de temperatura observados en la zona de estudio muestran la aparición de un centro focal de aumento de temperatura al Sur de Ibarra, limitante con Antonio Ante, y un avance de frentes con mayor temperatura desde el noroeste. La tendencia general para el Sur de la zona de estudio muestra la reducción de temperaturas desde el Suroeste hacia el Norte, mientras que existe un nuevo centro con mayores temperaturas en el Oriente, cuyos efectos se observan con el incremento de temperatura en el Este de Baños.
8. Mediante los resultados gráficos del presente estudio, se observa que existe una relación existente entre los aumentos de temperatura y las variaciones de precipitaciones, siendo posible considerar que debido a los incrementos de temperatura se produce una reducción de precipitaciones. Por esta razón, se observa un centro focal de elevadas temperaturas en Ibarra y Antonio Ante, cuya aparición conlleva a la reducción de precipitaciones hacia el norte hasta la zona de Espejo.

5.2. Recomendaciones

1. Al trabajar con escenarios de cambio climático, es necesario conocer el alcance que plantea el estudio, dado que existe una serie de limitaciones para cada tipo de escenario determinando así la viabilidad de aplicación de cada uno, siendo las más importantes las escalas de resolución presentes en cada modelo.
2. Debido a que la utilización de modelos destinados a la generación de escenarios de cambio climático presente un acercamiento a las posibles condiciones existentes en un área determinada, se considera apropiada la ampliación de estudios para lograr obtener una mayor cobertura para diversas zonas del Ecuador, permitiendo así evaluar el comportamiento de las variables climáticas en más ubicaciones del territorio nacional.
3. Debido a la reciente instalación de una estación meteorológica dentro de la granja UDLA en el año 2014, se considera posible la inclusión de una serie de datos obtenidos por medio de los instrumentos meteorológicos presentes en la estación al presente estudio, para incrementar los puntos de análisis y poder localizar un mayor número de variables a ser consideradas al momento de desarrollar escenarios a futuro para la región planteada.
4. Se considera pertinente la expansión de zonas de análisis para otras regiones dentro del Ecuador, permitiendo generar una mayor cobertura de franjas regionales que pudiesen necesitar de análisis que relacionen las variaciones de temperatura con las posibles reducciones o los incrementos de precipitaciones.

Referencias

- Alonso, J. (17 de abril de 2008). Estaciones Meteorológicas. Recuperado el 27 de octubre de 2013, de <http://www.slideshare.net/javitoy/estaciones-meteorologicas>
- Alonso, P. (2006). SIG y Teledetección en la Universidad de Murcia. Murcia, España.
- Bohling, G. (2005). Kriging. Kansas, USA.
- Busuioc, A., Von Storch, H., y Schnur, R. (1998). Verification of GCM-Generated Regional Seasonal Precipitation for Current Climate and of Statistical Downscaling Estimates under Changing Climate Conditions. Geesthacht.
- Castro, M. (2007). Los modelos climáticos globales. Toledo, España.
- Chen, S. S., & Gopinath, R. (2001). Gaussianization.
- CMNUCC. (1992). CONVENCIÓN MARCO DE LAS NACIONES UNIDAS SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO.
- Cordano, E., & Eccel, E. (2012). RMAWGEN: A software project for a daily Multi-Site Weather Generator with R. Fondazione Edmund Mach San Michele all'Adige, Trentino.
- Dymnikov, V., Lykosov, V., y Volodin, E. (2006). Problems of Modeling Climate and Climate Change. Moscú: Pleiades.
- ESRI. (7 de Noviembre de 2012). Conceptos del conjunto de herramientas de Interpolación. Recuperado el 12 de Marzo de 2014, de <http://help.arcgis.com/es/arcgisdesktop/10.0/help/index.html###009z00000075000000>
- ESRI. (10 de octubre de 2013). Introducción al modelamiento de superficies. Redlands, California, USA.
- ESRI. (9 de Noviembre de 2013). Vista general del conjunto de herramientas Interpolación. Recuperado el 22 de Marzo de 2014, de <http://resources.arcgis.com/es/help/main/10.1/index.html###009z000000003000000>
- FAO. (2013). Recuperado el 15 de Octubre de 2013, de <http://www.fao.org/docrep/006/w1309s/w1309s05.htm>

- Füssel, H.-M., y Mastrandrea, M. (2009). *Integrated Assessment Modeling*.
- García , J., y Cebrián, F. (2008). La interpolación como método de representación cartográfica para la distribución de la población: aplicación a la provincia de Albacete. UCLM, Geografía y Ordenación del Territorio, Albacete.
- INAMHI. (2010). *Proyecto "Fortalecimiento e Implementación de la Red Básica de Estaciones Meteorológicas e Hidrológicas de la República del Ecuador"*. Quito.
- IPCC. (2007). *Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. . Ginebra, Suiza. .
- Jones, R., Noguer, M., Hassell, D., Hudson, D., Wilson, S., Jenkins, G., y otros. (Abril de 2004). *Generating High Resolution Climate Change Scenarios Using Precis*. Exete, Reino Unido.
- Lingerfjärd, T. (2006). *Faces of mathematical modeling*. Suecia .
- MAE. (Diciembre de 2009). *Estudio de vulnerabilidad actual a los riesgos climáticos en el sector de los recursos hídricos en las cuencas de los Ríos Paute,.* Quito, Ecuador.
- MAE. (2012). *Estrategia Nacional de Cambio Climático*. Quito: Ministerio del Ambiente.
- Manly, B. (2009). *Statistics for environmental science and management (Second ed.)*. Cheyenne, Wyoming, United States: CRC Press.
- Mearns, L. O., Giorgi, F., Whetton, P., y Pabon, M. (2003). *Guidelines for Use of Climate Scenarios Developed from Regional Climate Model Experiments*.
- Melo , P., Herrera , X., y Galeas, R. (2012). *MODELO BIOCLIMÁTICO DEL ECUADOR CONTINENTAL*. Quito, Ecuador.
- Mijares, F. J. (1992). *Fundamentos de Hidrología de superficie*. México: Limusa.
- Ministerio del Ambiente de España. (2006). *Programa Coordinado para Generación de Escenarios Regionalizados de cambio climático*. España.

- Monsalve, G. (1999). Hidrología en la Ingeniería. Bogotá - Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Muñoz, Á. (Septiembre de 2010). Validación y Análisis de Consenso de Modelos de Escenarios de Cambio Climático para Ecuador. Maracaibo, Venezuela.
- NASA. (17 de Junio de 2009). Shuttle Radar Topography Mission. Recuperado el 25 de Noviembre de 2013, de <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>
- Ontaneda, G. (2007). Evidencias del Cambio Climático en el Ecuador. Quito.
- Paredes, C., Salinas, W., Martínez, X., y Jiménez, S. (2012). Evaluación y comparación de métodos de interpolación determinísticos y probabilísticos para la generación de modelos digitales de elevación. UNAM, Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía.
- Petzoldt, T. (2013). Data Analysis with R Selected Topics and Examples.
- Pourrut, P. (1983). LOS CLIMAS DEL ECUADOR, FUNDAMENTOS EXPLICATIVOS. Quito.
- Pourrut, P. (1995). El Agua en el Ecuador. Clima, precipitaciones, escorrentía. Quito: Corporación Editora Nacional.
- Pourrut, P., y Gómez, G. (1998). El Ecuador al cruce de varias influencias climáticas. Una situación estratégica para el estudio del Fenómeno del Niño.
- Rivas-Martinez, S. (27 de Agosto de 2004). Global Bioclimatics: Clasificación Bioclimática de la Tierra. Madrid, España.
- Rojas, D. (2007). Spatial interpolation techniques for estimating levels of pollutant concentrations in the atmosphere. Centro de Investigación en Geografía y Geomática, "Ing. Jorge L. Tamayo", Tlalpan.
- Rojas, R. A. (2013). Ordenamiento Territorial y Cambio Climático Metodología para incorporar Cambio Climático y Gestión del Riesgo de Desastres en procesos de OT. Peru.
- SNI, Base de datos de información geográfica. (s.f.). Recuperado el 09 de Octubre de 2013, de <http://www.sni.gob.ec/web/guest/coberturas>
- The PRECIS Regional Climate Modelling System. (25 de Julio de 2013). The PRECIS Regional Climate Modelling System. Recuperado el 10 de

Enero de 2014, de The PRECIS Regional Climate Modelling System:
<http://www.metoffice.gov.uk/precis/intro>

Villatoro, M., Henríquez, C., y Sancho, F. (2008). Comparación de los interpoladores IDWy Kriging en la variación espacial de pH, Ca, CICE y P del suelo.

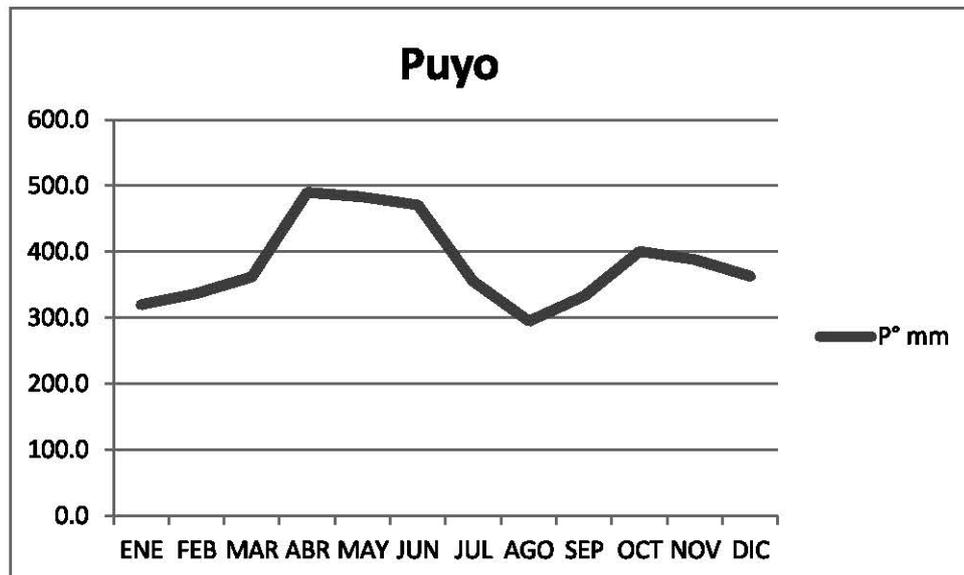
ANEXOS

ANEXO 1

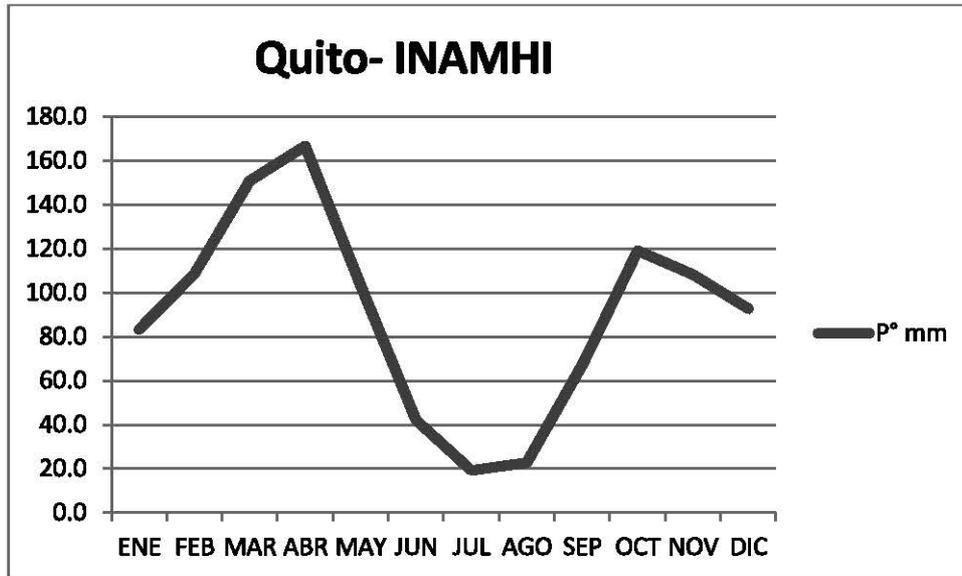
Gráficos para caracterización de regímenes pluviométricos en las estaciones seleccionadas para análisis de datos en la zona de estudio.

Recordando los regímenes:

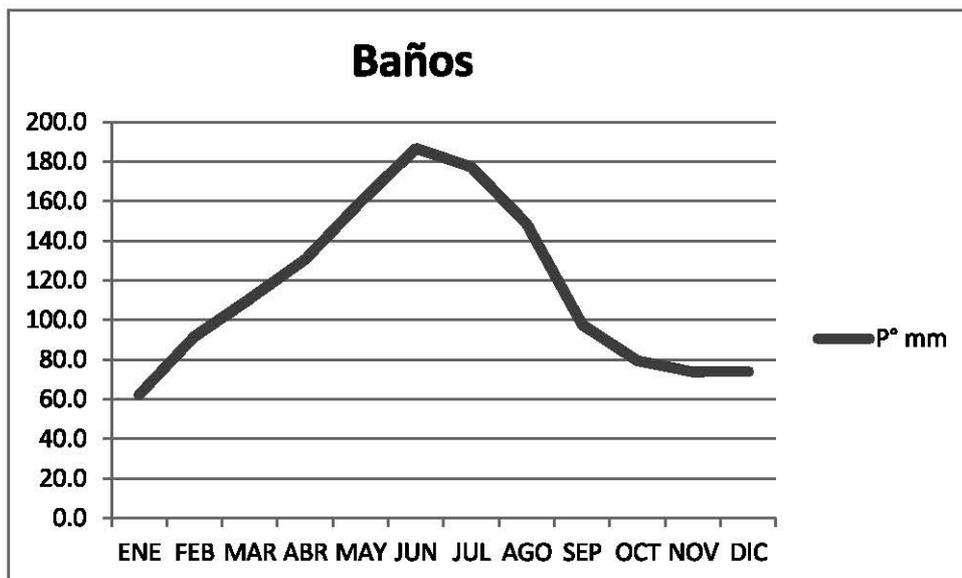
- Ecuatorial, dos picos pluviométricos.
- Tropical, un máximo lluvioso y una sola estación seca muy marcada.
- Subtropical, intermedias entre Tropical y Ecuatorial.
- Uniforme, lluvias bien distribuidas a lo largo del año.



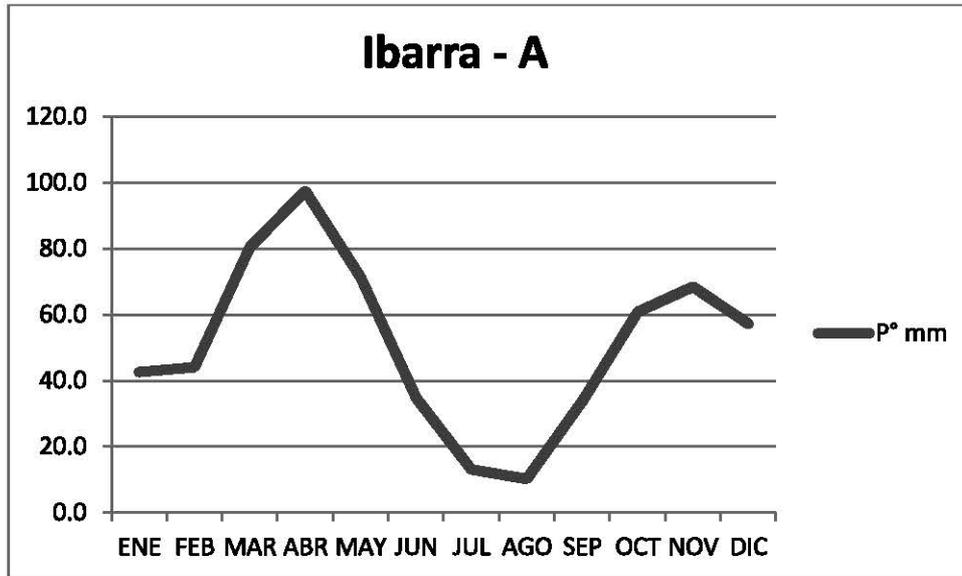
Subtropical



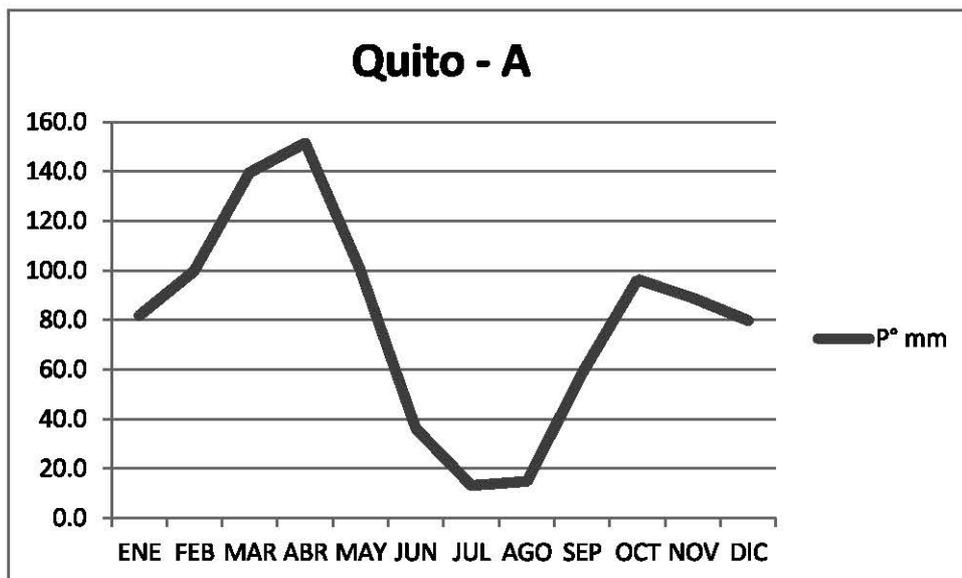
Ecuatorial



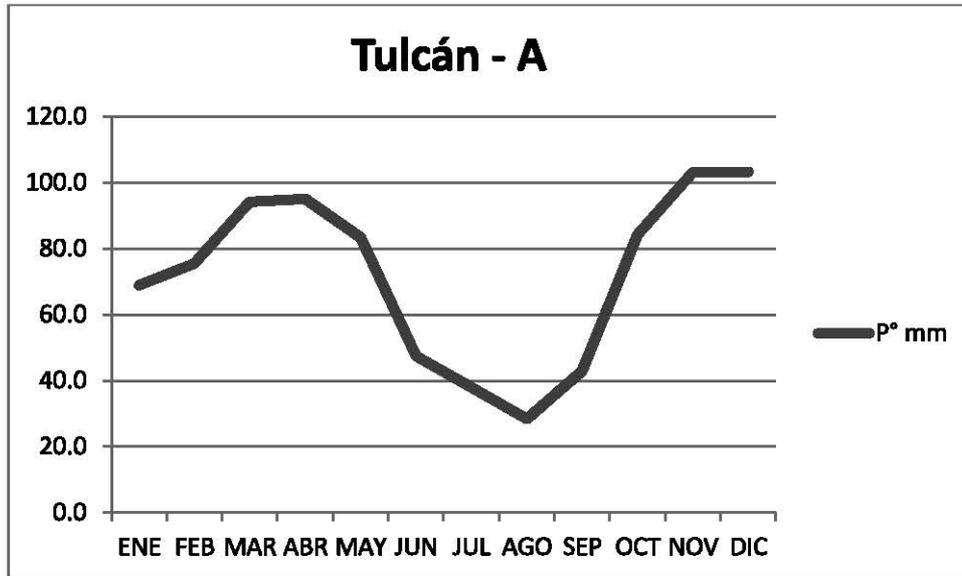
Tropical



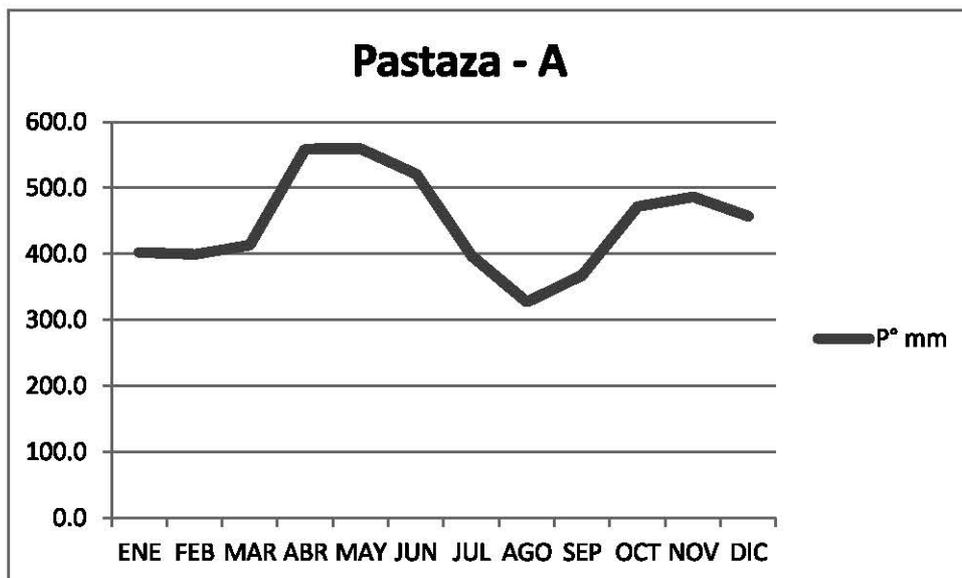
Ecuatorial



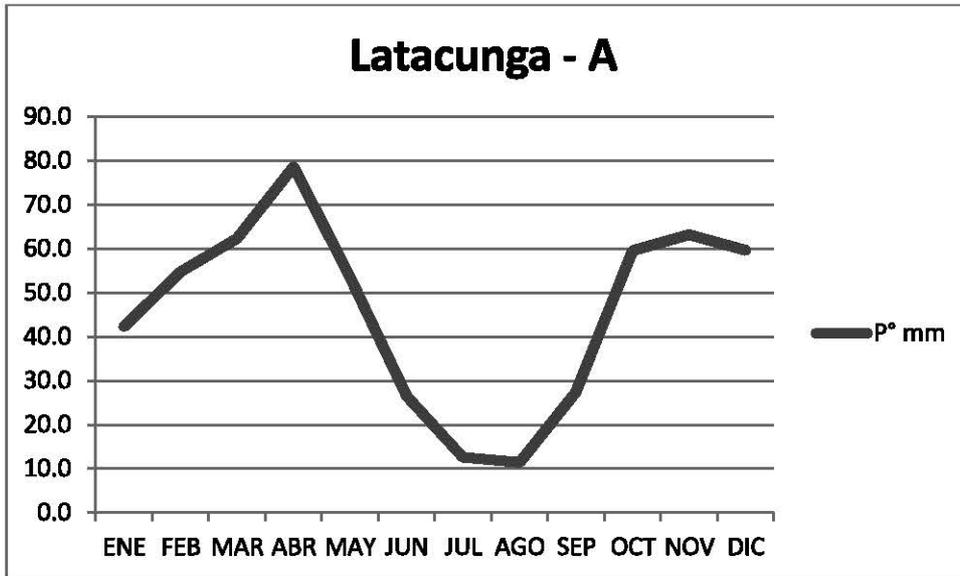
Ecuatorial



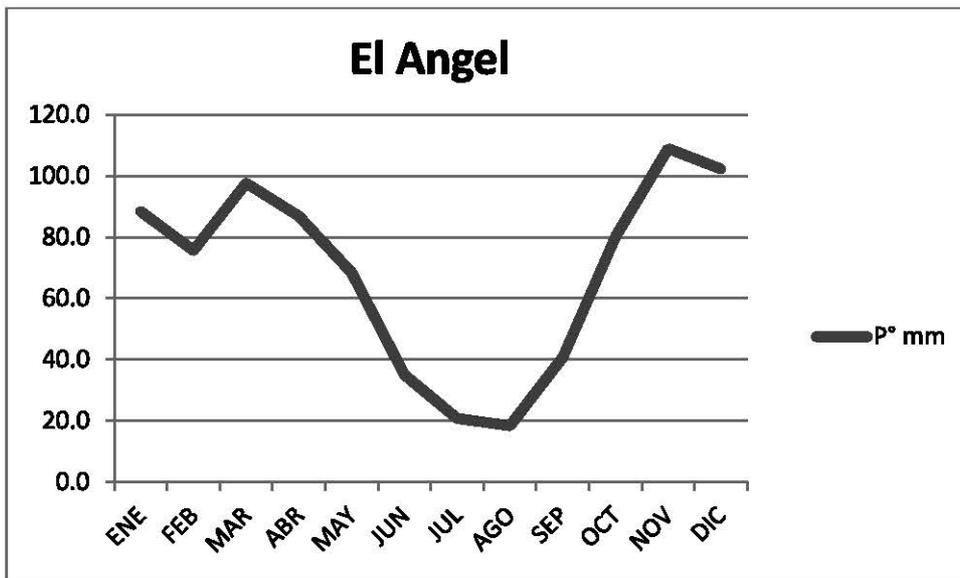
Ecuatorial con tendencia a Uniforme.



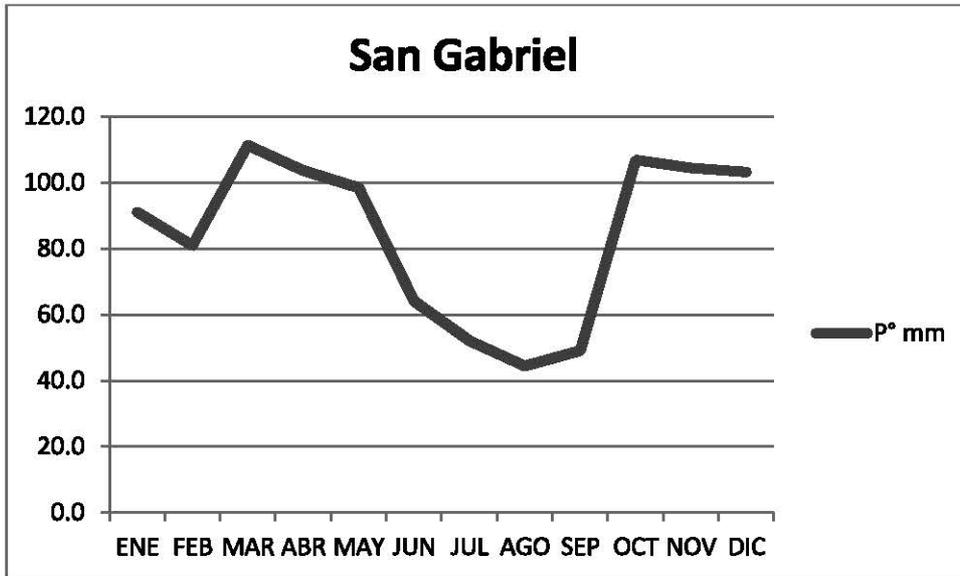
Subtropical.



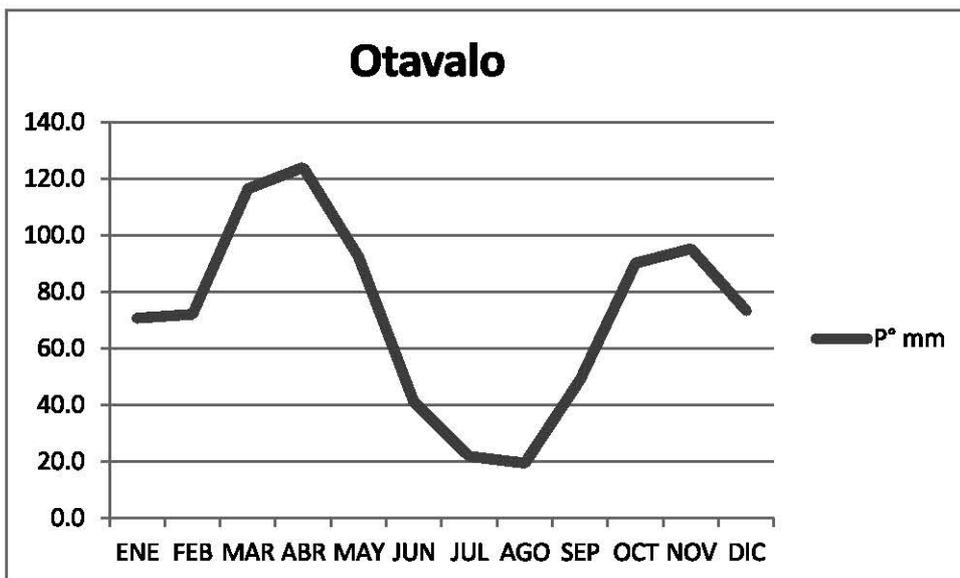
Ecuatorial



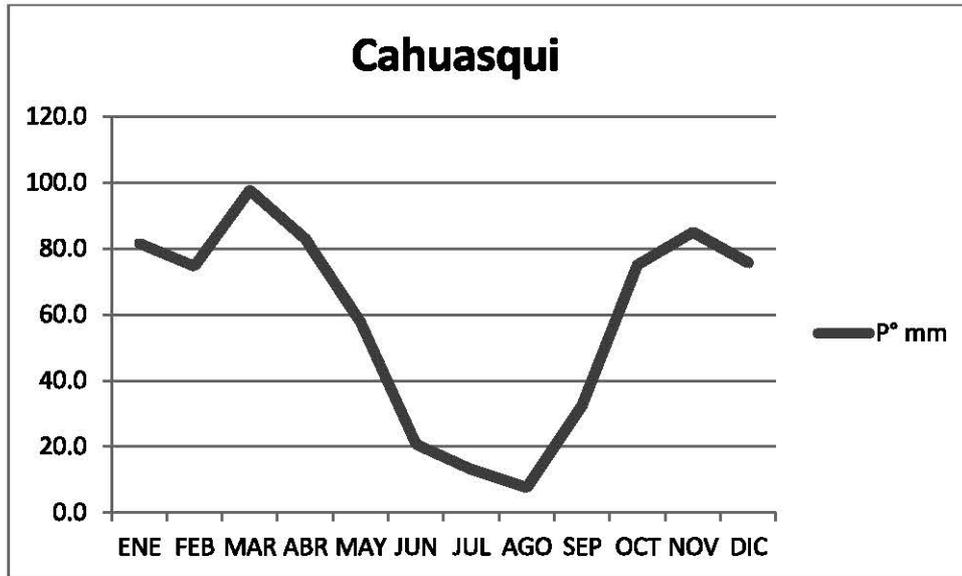
Ecuatorial.



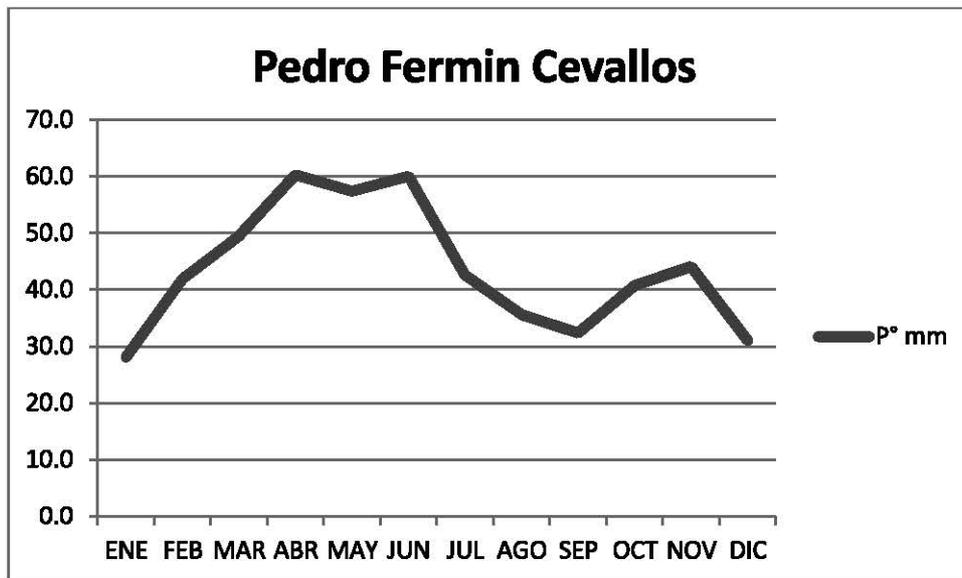
Ecuatorial con tendencia a Uniforme.



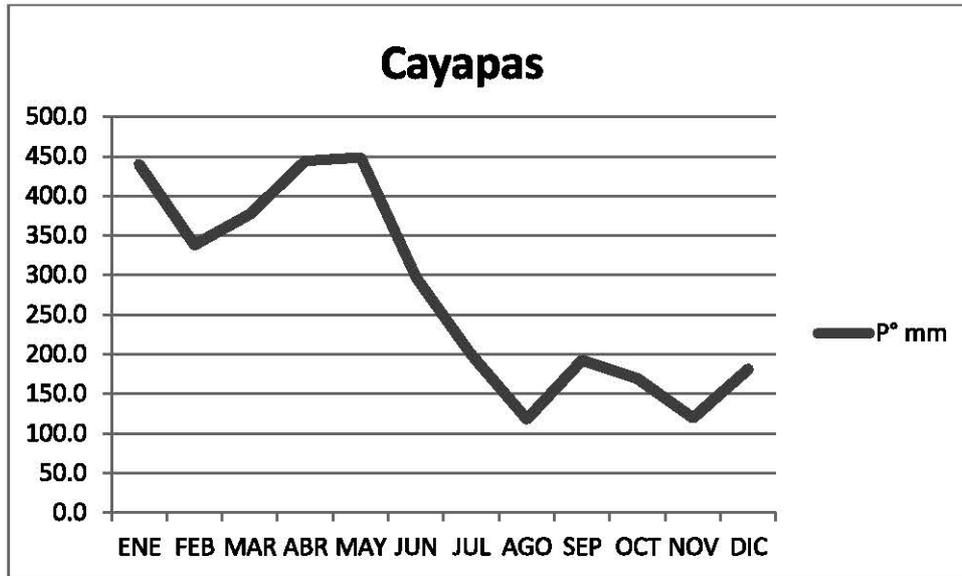
Ecuatorial



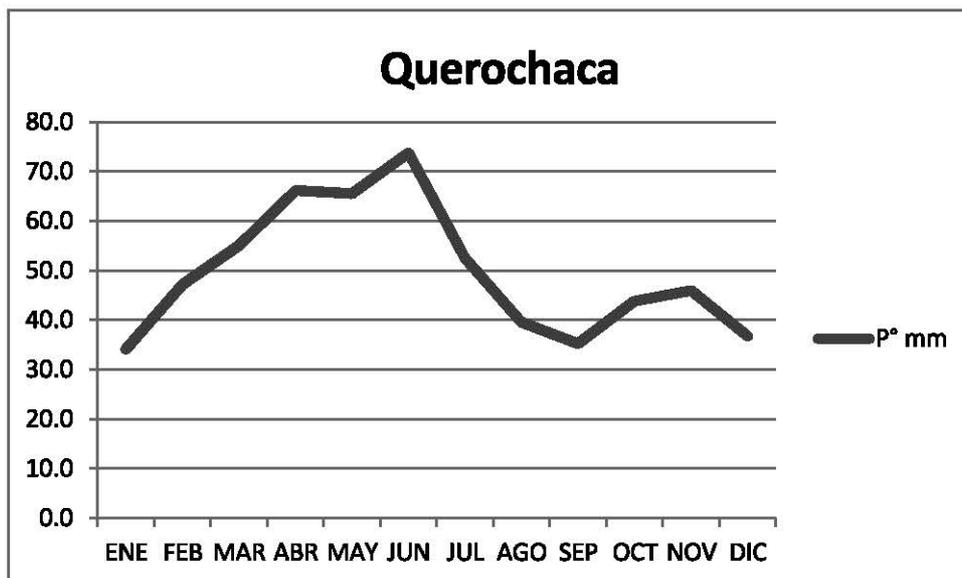
Ecuatorial



Ecuatorial con tendencia a Uniforme



Tropical



Tropical con tendencia a Uniforme

Anexo 2

Ventana de trabajo del software R-Studio con comando del modelo matemático del RMAWGEN

The screenshot displays the R-Studio interface with the following components:

- Source Editor:** Contains R code for the RMAWGEN model, including variable assignments, function calls like `ComprehensiveTemperatureGenerator`, and normality tests.
- Environment:** Shows the global environment with data objects: `PRECIPITATION` (18262 obs. of 62 variables), `STATION_LATLON` (num [1:59, 1:3]), `TEMPERATURE_MAX` (18262 obs. of 62 variables), and `TEMPERATURE_MIN` (18262 obs. of 62 variables). It also lists values for `ELEVATION`, `LOCATION`, `PRECIPITATION_M.num`, `STATION_NAMES`, and `TEMPERATURE_MEA.num`.
- Files:** Lists files in the `~/R/win-library/3.1/RMAWGEN/doc/examples` directory, including `comprehensive T generator.R`, `example_scripts_presentation`, `marginal_gaussianization1.R`, `P' generation presentacion.R`, `precipitation-generator.R`, `T generation presentacion.R`, `T-generator.R`, `T_modelo_adaptadp.R`, and `temperature-generator.R`.

```
1
2 View(TEMPERATURE_MAX)
3 set.seed(1222)
4 station <- c("T0090") |
5 TX_CLIMATE <- NULL #TX_1961_1990[,station]
6 TN_CLIMATE <- NULL #Tn_1961_1990[,station]
7 PREC_CLIMATE <- NULL #prec_1961_1990[,station] # NULL # Adjusts prec_1961_1990 with days!!!!
8 year_max <- 1990
9 year_min <- 1961
10 origin <- "1961-1-1"
11 n_GPCA_iter <- 5
12 n_GPCA_iteration_residuals <- 5
13 p_test <- 1
14 p_temp <- 10
15 exogen <- NULL
16 exogen_sim <- exogen
17 generationP10GPCA_temp <- ComprehensiveTemperatureGenerator(station=station, TX_all=TEMPERATURE_
18 generationP01GPCA_temp <- ComprehensiveTemperatureGenerator(station=station, TX_all=TEMPERATURE_
19 generationP10_temp <- ComprehensiveTemperatureGenerator(station=station, TX_all=TEMPERATURE_MAX,
20 generationP01_temp <- ComprehensiveTemperatureGenerator(station=station, TX_all=TEMPERATURE_MAX,
21 VARselect(generationP01_temp$input$data_for_var, lag.max=20)
22 VARselect(generationP01_temp$input$data_for_var, lag.max=20)
23 VARselect(generationP01GPCA_temp@GPCA_data$final_results, lag.max=20)
24
25
26 normality_test(generationP01_temp$var)
27 normality_test(generationP10_temp$var)
28 normality_test(generationP01GPCA_temp$var)
29 <
4:23 [Top Level] >
```

Console output:

```
Type 'demo()' for some demos, 'help()' for on-line help, or
'help.start()' for an HTML browser interface to help.
Type 'q()' to quit R.

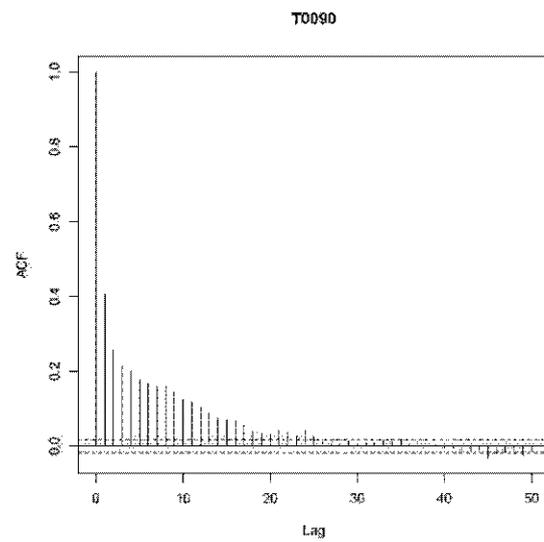
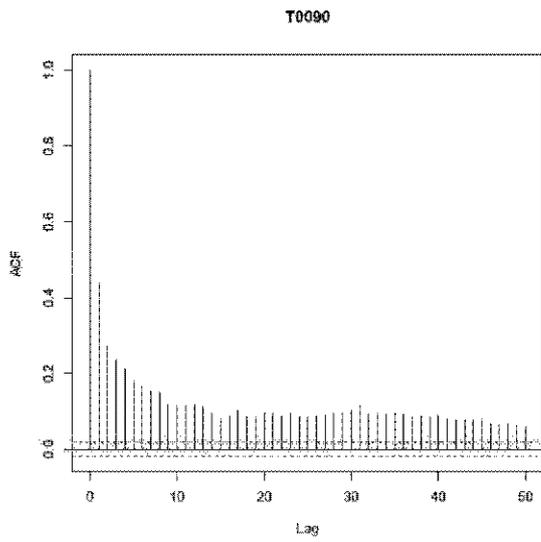
[workspace loaded from ~/.RData]

> |
```

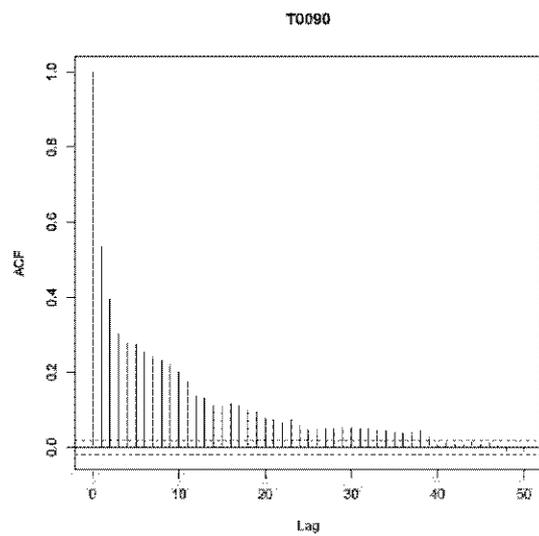
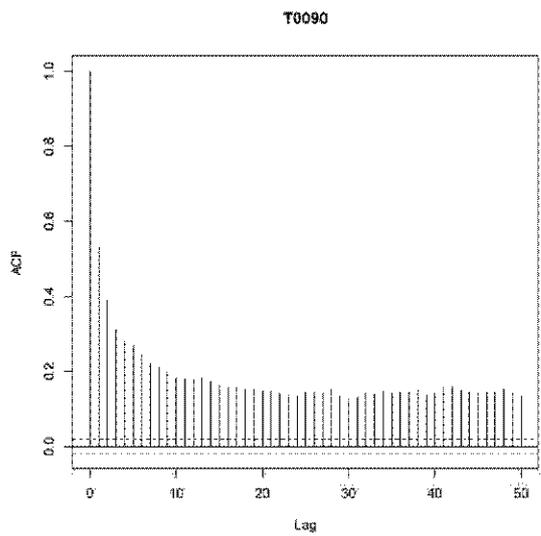
Anexo 3

Base del Sistema de Autocorrelación del modelo matemático utilizado en la plataforma R para temperaturas

Temperatura máxima



Temperatura mínima



Δ temperaturas

