

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE DATOS METEOROLÓGICOS MENSUALES Y DIARIOS PARA LA DETERMINACIÓN DE VARIABILIDAD CLIMÁTICA Y CAMBIO CLIMÁTICO EN EL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO

STATISTICAL ANALYSIS OF DAILY AND MONTHLY METEOROLOGICAL DATA OF
THE METROPOLITAN DISTRICT OF QUITO FOR WEATHER VARIABILITY AND
CLIMATE CHANGE STUDIES

Sheila Serrano Vincenti¹, Diana Zuleta¹, Viviana Moscoso¹, Pablo Jácome¹,
Enrique Palacios^{1,2} y Marcos Villacís³

¹ Centro de Investigación en Modelamiento Ambiental CIMA-UPS, Universidad Politécnica Salesiana, Red de Universidades Frente al Cambio Climático y Gestión de Riesgos, Av. 12 de Octubre N24-22 y Wilson, Telf: 593 02 3962800.

² Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento EPMAPS, Dir. Mariana de Jesús entre Alemania e Italia, Teléfonos: 1800-242424, 02-299-4500, Quito, Ecuador.

³ Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Escuela Politécnica Nacional, Red de Universidades Frente al Cambio Climático y Gestión de Riesgos, Apartado postal 17-01-2759, Ladrón de Guevara E11-253 EC170112, Quito, Ecuador.

Autor para correspondencia: sserranov@ups.edu.ec

Manuscrito recibido el 30 de septiembre. Aceptado, tras revisión, el 15 de Diciembre de 2012.

Resumen

El objetivo de la presente investigación es establecer el impacto que ha tenido el cambio climático y la variabilidad climática sobre el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ) y sus alrededores en los últimos años. De esta manera, se han realizado dos tipos de análisis de tendencias sobre 30 años de datos proporcionados por el INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología): el primero busca evidenciar cambios graduales, a través del análisis de datos mensuales de temperaturas máximas, mínimas, precipitación, heliofanía, humedad relativa y nubosidad; utilizando una regresión lineal por el método de mínimos cuadrados más una prueba F para determinar su significancia estadística. El segundo estudio se realizó con el objetivo de analizar el comportamiento de los eventos extremos, sobre datos diarios en las variables de temperaturas máximas, mínimas y de precipitación, a través del paquete computacional RCLimDex para el cálculo de índices de cambio climático recomendados por el ECTCCDI (*Expert Team on Climate Change Detection and Indices*). Los resultados muestran incrementos en las tendencias y comportamientos anómalos que pueden considerarse consecuencia del cambio climático o variabilidad climática.

Palabras claves: Cambio climático, variabilidad climática, tendencias estadísticas, RCLimDex, DMQ.

Abstract

The present study aims to determine the effects of climate change in the weather variability in the Metropolitan District of Quito and its surroundings in the last 30 years. For this purpose, using data from the National Institute of Meteorology and Hydrology (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología - INAMHI), two statistical treatments were performed. First, a trend analysis of the maximum and minimum monthly temperatures, precipitation, heliophany, relative humidity and cloudiness using a standard least squares linear regression method and its associated F-test to determine the statistical significance of the model was done. The second treatment, looking for extreme events, we analyzed daily data in order to determine temperature and precipitation extremes using RclimDex package following the ECTCCDI (*Expert Team on Climate Change Detection and Indices*) recommendations. The results shows increases in trends and anomalous behavior that may be considered as a result of the effect of climate change and climate variability.

Keywords: climate change, weather variability, statistical trends, RclimDex, Quito.

Forma sugerida de citar: Serrano, S., D. Zuleta, V. Moscoso, P. Jácome, E. Palacios y M. Villacís. 2012. **Análisis estadístico de datos meteorológicos mensuales y diarios para la determinación de variabilidad climática y cambio climático en el Distrito Metropolitano de Quito.** La Granja. Vol. 16(2): 23-47. ISSN: 1390-3799.

1. Introducción

1.1 Cambio climático y variabilidad climática

La variabilidad climática y el cambio climático, cada día afectan de manera más evidente el clima actual y futuro. Por una parte, el cambio climático se define como una modificación del clima duradera y significativa con respecto a un historial climático, tanto a escala regional como global y sobre variados parámetros meteorológicos. Sus causas pueden ser naturales: procesos oceánicos, variaciones en la radiación solar recibida por la Tierra, la tectónica de placas y erupciones volcánicas, entre otras (Crowley y North, 1988) y antropogénicas (Oreskes, 2004). Sin embargo, recientemente este término ha sido adoptado por La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático-CMNUCC (1987), para referirse a aquel cambio producto de la actividad humana a través de su alteración sobre la composición química atmosférica, debido a la mayor presencia de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en todo el mundo (IPCC, 2007); aunque este cambio que debe sumarse a la variabilidad natural del clima observada durante períodos comparables (Jiménez, 2007). Asimismo, hay que indicar que existe un consenso científico respecto a esta definición, que viene desde el Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC por Intergovernmental Panel on Climate), el cual tiene por objetivo generar un vínculo entre los generadores de ciencia y los tomadores de decisión respecto a este tema. De esta manera, se han determinado tres características generales que pueden ser atribuidas al Cambio Climático: un incremento general y gradual de la temperatura, cambios en los comportamientos de las precipitaciones e incremento de eventos extremos (IPCC, 1995).

Por otra parte, la variabilidad climática consiste en aquellos cambios sobre el clima que dependen de condiciones atmosféricas extremas que exceden en mucho a los promedios estándares. Los fenómenos que producen esos contrastes pueden ser frentes fríos muy organizados, células estacionarias secas, huracanes, perturbaciones tropicales y células con una humedad desproporcionada. Para el caso del Ecuador, se relaciona la variabilidad climática con la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), el Fe-

nómeno del Niño y la Niña (ENSO por sus siglas en inglés El Niño South Oscillation), y otros fenómenos recientemente estudiados como la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO por Pacific Decadal Oscillation) y el Fenómeno Modoki (Serrano Chano, 2010).

La ZCIT es un cinturón de baja presión que rodea al globo terrestre en la región ecuatorial, está formada por la convergencia de aire cálido y húmedo de latitudes por encima y por debajo del ecuador y su localización depende del movimiento aparente del Sol respecto su cenit, logrando alcanzar 8° al norte, durante los meses de junio y julio, y 1° al sur durante el mes de abril (RAM, 2002 citado en Serrano Chano, 2010). Mientras, ENSO es un fenómeno cíclico que se inicia con cambios en las temperaturas del Océano Pacífico Tropical. Las dos fases del ciclo (El Niño, la fase cálida, y La Niña, la fase fría) influyen en la presión del aire, en los totales de precipitación y en las temperaturas en todo el mundo, que pueden estar por encima o por debajo de lo normal. Cada fase tiene un período medio de repetición tiempo de 3 a 5 años aunque basándose en un récord histórico, el intervalo entre los acontecimientos ha variado de 2 a 7 años (ESPERE, 2004). Al Ecuador, El Niño llega generalmente en diciembre, lo cual le ha dado su nombre. Dentro de la familia de El Niño, se encuentra La Niña, que se trata del fenómeno inverso, i.e un frente frío que se aproxima a la costa ecuatorial con las consecuencias contrarias. Asimismo, se encuentra Modoki, que se manifiesta por el recalentamiento de la zona central y que durante las últimas décadas se ha vuelto más frecuente, en base a simulaciones se maneja la hipótesis de que los eventos Modoki serán cinco veces más frecuentes en el horizonte del 2050 (*Sciences au sud*, Nov - Dic 2009, citado en Serrano Chano, 2010). Finalmente, se tiene a la Oscilación Decadal del Pacífico, fenómeno asociado con un recalentamiento de ENSO pero con períodos significativamente más largos de 20 a 30 años (Espinoza *et al.*, 2009).

De esta manera, y según la Primera Comunicación Nacional, Quito (2000), Ecuador es altamente vulnerable a los impactos del Cambio Climático, debido no sólo a su ubicación geográfica, y a variada topografía, sino a la ocurrencia de éstos fenómenos periódicos. Se espera que el aumento de temperatura, sequías e inundaciones recurrentes, derretimiento de glaciares y una intensificación y variación de los patrones de precipitación, tengan un amplio espectro de impactos en el país (Muñoz *et al.*, 2010).

1.2 Eventos Extremos

El Cambio Climático puede provocar un aumento en la frecuencia y/o intensidad de eventos climáticos extremos como son las sequías severas y precipitaciones intensas (Riebeck, 2005). Por el incremento de la temperatura promedio se incrementa la presencia de vapor de agua -según la termodinámica básica, más temperatura, más vapor de agua puede contener la atmósfera-, mientras que la presencia de mayores cantidades de GEI y otros contaminantes en la atmósfera crean condiciones propicias para la nucleación aumentando la probabilidad de los eventos lluviosos, sobre todo aquellos intensos ya que cuentan con el sustento hidrológico extra que requieren. Por otro lado, el calentamiento acelera el secado de la superficie del suelo y se incrementa la posibilidad y severidad de las sequías, afectando con ello a las fuentes de agua y creando condiciones propicias para incendios forestales (IPCC, 1995).

Cualquier cambio en la frecuencia o la gravedad de los eventos climáticos y sobretodo en los eventos extremos generan un profundo impacto en la naturaleza y la sociedad, más en estos días en que las percepciones sociales en cuanto a la gravedad del cambio climático se han intensificado (Leiserowitz, 2012). A pesar de su importancia, la vigilancia y detección de estos eventos requieren datos con resolución diaria; cuya obtención resulta ser difícil, ya que demanda gran seguimiento y post-tratamiento de datos de parte de los Servicios Meteorológicos e Hidrológicos (SMHN), tanto en Ecuador como en resto del mundo. Esto, sin contar con el hecho de que las metodologías utilizadas deben ser homogéneas para toda la comunidad meteorológica mundial (ETCCDI/CRD, 2011). Asimismo, los eventos extremos quedan invisibilizados si la resolución temporal es insuficiente, un gran temporal que generalmente dura horas, difícilmente se detec-

tará al referirse a los datos mensuales. Bajo esta perspectiva, inclusive es recomendable trabajar con datos horarios o de menor resolución (Folland *et al.*, 2000).

Así, diversas organizaciones de expertos a nivel internacional se han reunido en una iniciativa macro denominada: CCI/CLIVAR/JCOMM Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ECTCCDI), sinergia que involucra a la Comisión de Climatología de la Organización Mundial de Meteorología (CCI por World Meteorological Organization Commission for Climatology), al programa de Investigación Climático Mundial en Variabilidad Climática y Predictibilidad (CLIVAR por Climate Variability and Predictability World Climate Research Programme) y a la Comisión Técnica para Meteorología Marina y Oceánica (JCOMM por Joint Technical Commission for Oceanography and Marine Meteorology). El objetivo de esta alianza es coordinar esfuerzos internacionales para desarrollar, calcular y analizar un conjunto de índices de cambio climático comunes para todos los países (Karl *et al.*, 1999) y (Peterson, 2001) así como para generar metodologías en la homogenización y control de calidad de los mismos (Castillo Pérez y Espinoza, 2009).

1.3 Índices de cambio climático recomendados por la ECTCCDI

El ECTCCDI aprobó una lista de 40 índices, de los cuales 27 fueron elegidos como los básicos para un análisis de eventos climáticos extremos, tomando en cuenta valores diarios de temperatura, cantidad de precipitación diaria, y umbrales fijos de relevancia para aplicaciones particulares. En las Tabla 2 y 3 se mencionan los índices más importantes para este estudio, su definición, limitaciones, efectos y cambios esperados según el escenario de aumento de emisiones de efecto invernadero (IPCC, 1995).

Tabla 1. Índices de cambio climático relacionados con el aumento de temperatura recomendados por la ECTCCDI, utilizados en este estudio. Adaptado de Frich (1999).

Indicador	Unid.	Nombre del indicador	Definición	Cambios esperados bajo por incremento de efecto invernadero (según IPCC,1995)
Tn90p	%	Porcentaje de noches cálidas	Porcentaje del tiempo en el que la Temperatura mínima supera al percentil 90 de datos diarios.	Los GEI forzan un incremento de temperatura haciendo que las noches cálidas se incrementen. Es una medida directa del número de noches cálidas. Este indicador podría reflejar efectos potencialmente dañinos por la ausencia del enfriamiento nocturno, principal contribuyente del estrés térmico. Limitaciones: Ninguna.
TNx	°C	Máximo de Temperaturas Mínimas	Valor mensual máximo de temperatura mínima diaria	
TR20	Días	Noches tropicales	Número de días en un año cuando la temperatura mínima supera los 20°.	
Tx90p	%	Porcentaje de días cálidos	Porcentaje del tiempo en el que la Temperatura máxima supera al percentil 90 de datos diarios.	Los GEI forzan un incremento de temperatura haciendo que las temperaturas durante el día se incrementen. También se puede interpretar como una medida de mayor heliofanía-menor cobertura nubosa-. Limitaciones: Ninguna
TXx	°C	Máximo de Temperaturas Máximas	Valor mensual máximo de temperatura máxima diaria	
DTR	°C	Rango de temperatura Diurna extrema Intraanual.	Diferencia entre las temperaturas máximas y mínimas para cada año	
CDD	Días	Número máximo de días secos consecutivos	Cuenta el número de días consecutivos sin precipitación al año	Los GEI forzan un incremento de la temperatura generando incremento de evaporación, favoreciendo potencialmente a las sequías. Limitaciones: Ninguna.

Tabla 2. Índices de cambio climático relacionados con las anomalías de la precipitación recomendados por la ECTCCDI, utilizados en este estudio. Adaptado de Frich (1999).

Indicador	Unid.	Nombre del indicador	Definición	Cambios esperados bajo por incremento de efecto invernadero (según IPCC,1995)
R95p	mm	Días muy lluviosos	Precipitaciones al año (en milímetros) que sobrepasan el percentil 95	Los GEI generan un incremento del ciclo hidrológico, ya que favorecen la nucleación del vapor de agua en lluvia. Asimismo, el incremento de temperatura permite que la atmósfera contenga más vapor de agua disponible, y por lo tanto se espera un incremento de precipitaciones intensas y/o extremas. Limitaciones: Ninguna.
R99p	mm	Días extremadamente lluviosos	Precipitaciones al año (en milímetros) que sobrepasan el percentil 99.	
R30mm	Días	Días con precipitación sobre 30mm	Número de días al año en los que la precipitación superó los 30mm.	

Con el objetivo de calcular estos índices de una manera general para todos los usuarios, se ha desarrollado un programa sobre lenguaje R, denominado R-climdex (F-climdex, si está desarrollado en Fortran, o Climdex sobre Excel), fue desarrollado por Byron Gleason del National Climate Data Centre (NCDC) de la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), y ha sido recomendado por el ECTCCDI desde 2001. Se trata de un programa de código abierto que no depende de un sistema operativo determinado, y que proporciona un paquete computacional fácil de usar para el cálculo de índices de extremos climáticos, así como para monitorear y detectar cambio climático. La Homogenización de los datos es un requisito anterior indispensable para poder ejecutar adecuadamente este programa (Zhang y Yang, 2004; Santos, 2004).

2. El clima en el DMQ

El DMQ se encuentra mayormente en la sierra ecuatoriana, contando así con valles, elevaciones y planicies que afectan la circulación del viento, generando topoclimas *i.e* acentuaciones o atenuaciones del clima regional de la zona debido al relieve. Las pendientes de estas elevaciones que apuntan al norte o al sur se exponen mayormente a la radiación solar se mantienen calientes más tiempo (Cornell University, 2009). La topografía variada causa cambios en zonas geográficas vecinas, y aunque una generalización que se puede hacer es que la temperatura es más baja a medida que la altitud aumenta aunque en ciudades como Quito, que se encuentra a 2850 msnm se presentan diferentes climas incluso en el mismo día (Inquito, 2005 citado en Serrano Chano, 2010).

2.1 Precipitación

La combinación de la orografía y las oscilaciones climáticas genera los climas característicos del DMQ *e.g* el efecto que tiene la ZCIT: mientras ésta atraviesa de oeste a este al país en los meses de diciembre y enero –desviando los vientos alisios que vienen de este a oeste– penetra la región con bajas presiones que favorecen la formación de nubes, generando un período lluvioso o invernal en estos meses. Éste comportamiento es más evidente en la zona noroccidental del DMQ ya que el resto del distrito se ve

“protegido” por el Pichincha, el cual hace de barrera a parte nubosidad formada. Sin embargo, este comportamiento se mantiene y aumenta gradualmente hasta los meses de marzo y abril en los cuales alcanza su máximo.

Mientras que entre los meses de julio y agosto cuando la ZCIT se desplaza al norte, deja circular los vientos alisios a través del país; sin embargo toda la humedad de estos vientos se ve atrapada por la configuración montañosa al oriente del DMQ, ya que ésta fuerza a que se eleven las masas de humedad enfriándolas y condensándolas generando precipitaciones en la zona amazónica, finalmente después de cruzar la cordillera oriental, la masa de aire llega al Distrito sin humedad y cuando desciende aumenta su temperatura, dando a lugar a la temporada seca y cálida o de verano característica de los meses de julio y agosto; este fenómeno es conocido como efecto Föhn mientras la precipitación aumenta en la Amazonía, ésta disminuye dramáticamente en Quito (Serrano Chano, 2010). Para determinar el comportamiento de la precipitación regionalizado en el DMQ, se generan, por el método conocido como Vector Regional mapas que definen los promedios de precipitación por área (Le Goulven *et al.*, 1988). Así, se generan mapas de isoyetas (Ver Fig. 1a), mientras que para determinar el comportamiento de temporal de la precipitación se han definido zonas con comportamientos comunes en el tiempo para esta variable (nombradas con las letras de la A a la G, Ver Figura 1b). En cada zona se tendrán índices por cada mes multiplicando el valor de la isoyeta por el correspondiente valor de la región en el tiempo dado. Este método del Vector Regional ha sido desarrollado por el IRD y es un método recomendado por el INAMHI debido a su consistencia estadística, aunque tiene como limitaciones la calidad de los datos de entrada, de los cuales depende, asimismo este método es válido únicamente a nivel mensual.

2.2 Temperatura

La temperatura es la única variable meteorológica que tiene una relación lineal con la altitud, a mayor altura, menor temperatura. Ésta desciende $-0,65^{\circ}$ por cada 100 m de ascenso en las zonas altas de la cordillera de los Andes, mientras que en la zona baja se presentan gradientes de $-0,53^{\circ}/100$ (ISA, 2005). Estos datos corresponden directamente a mostrado

en el Mapa de Temperatura Media Anual (MDMQ-SA, 2009).

Asimismo, es importante anotar, que el microclima generado por la zona urbana, cubierta de concreto y asfalto, genera un aumento de temperatura de aproximadamente 1° C respecto al resto de la zona, fenómeno conocido como “isla de calor” el cual puede intensificar los comportamientos anteriormente descritos. En el caso del Vector Regional, sólo se ha determinado una región preponderante en la Cuenca del Guayllabamba, y por lo tanto para el DMQ según la tesis de Serrano Chano (2010)

2.3 Humedad

Debido a la ubicación del DMQ en la sierra, los relieves son la razón fundamental para la distribución de la humedad en la zona. Según el efecto Föhn, las masas de aire cargadas de humedad provenientes del océano se enfrían y condensan al llegar al piedemonte de la cordillera de 0 a 1500 msnm, aumentando de esta manera la humedad relativa a estas altitudes, como ocurre en el caso de Mindo (Serrano Chano, 2010). Las zonas ubicadas a mayores altitudes no reciben la misma cantidad de humedad, aunque de los 3000 a 5000 msnm, se encuentra una nueva región de enfriamiento de las masas de aire que provoca condensación y por lo tanto la aparición de nubes y una zona con mayor humedad como son los páramos de la cuenca.

2.4 Heliofanía y nubosidad

Nuevamente, la naturaleza montañosa del DMQ provoca una diferencia de horas de sol recibidas y la nubosidad en general. La mayor parte del Distrito recibe a plenitud la luz del sol excepto en horas del amanecer y ocaso, en donde las elevaciones provocan sombras en ciertas zonas.

La zona de Quito y los valles son los primeros en recibir luz pero antes llegar al ocaso pasan más tiempo con sombra que el resto de la cuenca. Los valores máximos de heliofanía se encuentran entre 2000 y 3000 msnm, *i.e* la zona correspondiente a los fondos de valles, en donde se recibe el calor del sol durante más tiempo lo que genera convecciones que

alejan a las nubes durante el día (en la noche se da el efecto inverso). Este comportamiento disminuye en altitudes superiores (3000 y 4000 msnm), que corresponden a los páramos, debido a la formación de neblinas en esta zona, para después en las zonas altas por sobre los 4000 msnm la heliofanía aumenta nuevamente.

2.5 Vientos

En lo que se refiere a los vientos, se puede decir que éstos aumentan de una manera prácticamente proporcional a la altura. Según Serrano Chano (2010), los valores de viento alcanzan su máximo a los 5000 msnm y un par de mínimos a las alturas de 150 msnm y 3500 msnm.

En el estudio sobre los datos de la red REMMAQ (Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico de Quito) con datos de 7 años (2004-2011), se encuentra que la dirección del viento se ve marcada por las elevaciones, siendo los más representativos aquellos que provienen del noroccidente en dirección oeste-este, para posteriormente encontrarse con una zona de convección del nororiente, provocada por el tipo de suelo con menor cobertura vegetal, determinada por la existencia de rellenos volcánico-sedimentarios (MDMQ-Secretaría de Ambiente, 2011). Este forzamiento hace que los vientos se desvíen hacia el sur, bordeando al Pichincha. Sin embargo también existen vientos que provienen del Este se encuentran con la cordillera este del DMQ, ésta impide que los vientos lleguen directamente del Este y sólo permite su ingreso desde el sur del DMQ, pero en una escala menor –al igual que el Pichincha impide que los vientos ingresen directamente desde el norte y sólo permite su ingreso desde el norte– De esta manera, se puede decir que los vientos en el Distrito tienen una dirección predominante norte-sur y una dirección secundaria sur-norte. Asimismo, se encuentra que los máximos valores horarios de velocidad del viento se registraron entre los meses de agosto y septiembre es decir durante la estación veraniega en la que se incrementan tanto la temperatura como la heliofanía. Los valores de viento máximos alcanzados son de hasta 7,4 m/s, logrado en la estación de Tumbaco (MDMQ, 2011).

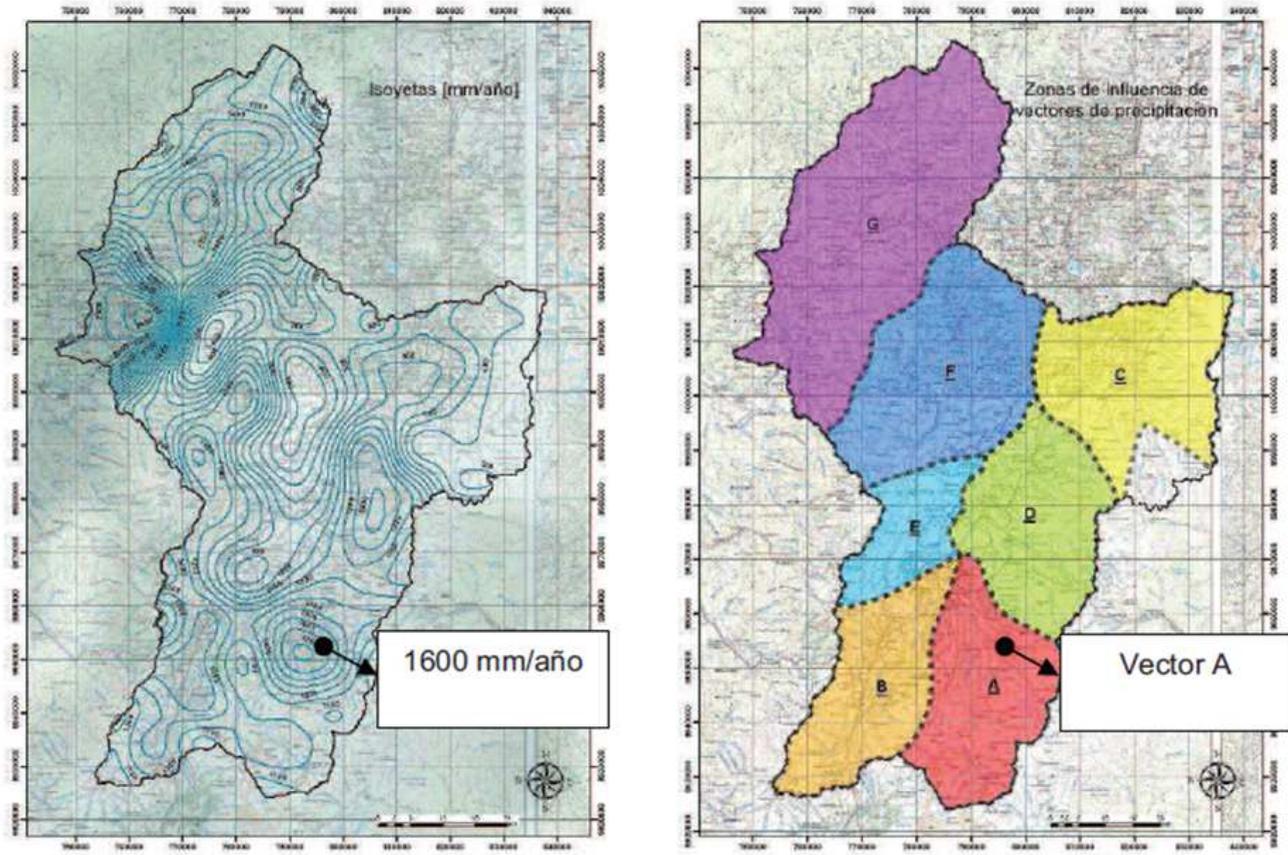


Figura 1. Curvas de isoyetas y regiones pluviométricas utilizadas para el cálculo del vector regional en la Cuenca del Guayabamba. Para determinar el valor de la precipitación en un punto determinado del mapa y en un mes del año. Basta con multiplicar el valor de la isoyeta (izq.) por el correspondiente vector, según la región (der.) en donde se encuentre. Tomado de Serrano Chano (2010)

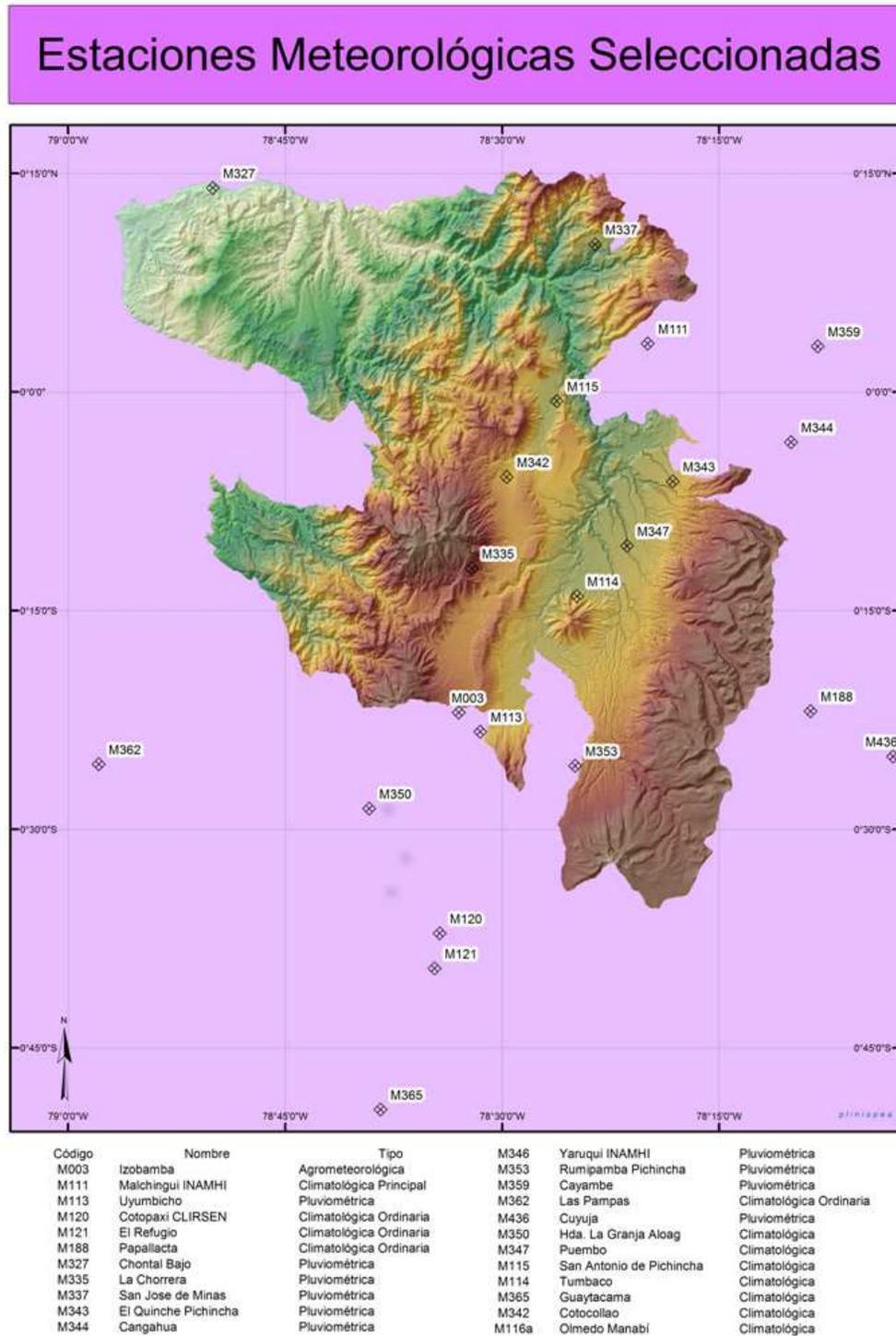


Figura 2. Detalle de las estaciones meteorológicas y su clasificación, de las cuales se dispusieron datos diarios y mensuales. Elaboración: Pedro Araujo.

3. Materiales y Métodos

El presente estudio comprende dos partes, la primera se trata de un análisis de tendencias estadísticamente significantes sobre datos mensuales, y la segunda del tratamiento con R-climindex sobre datos diarios. Ambos conjuntos de datos fueron proporcionados por el INAMHI. La ubicación de las estaciones meteorológicas de las cuales se entregaron los datos, se detalla en la Figura 2.

3.1 Análisis de datos mensuales

Las estaciones que entregaron datos mensuales se detallan en la Tabla 4. A pesar de que el INAMHI entregó información de 52 estaciones del DMQ y sus alrededores (50 km a la redonda), sólo se escogieron aquellas estaciones con 30 o más años de datos, incluyendo la estación de El Refugio-Cotopaxi que tenía 27 años de registros y la estación Cuyuja con 29 años. Las variables estudiadas son precipitación (marcada con la variable rr), temperatura máxima (tx), y temperatura mínima (tn), heliofanía efectiva mensual (he), humedad relativa mensual (hr), evaporación potencial (ev) y nubosidad media mensual (n). Cabe indicar que las autoridades del INAMHI, entregaron los datos previamente homogenizados y con control de calidad. Sin embargo se realizó un segundo control de calidad básico sobre los datos.

Sobre cada matriz de datos entregada por el INAMHI se generó una línea de tendencia a través del método de mínimos cuadrados y para determinar su significancia estadística se le generó una prueba F con una significancia del 80%. Este tratamiento incluye una gráfica en serie de tiempo y el Análisis de Varianza correspondiente.

3.2 Análisis de datos diarios con RCLim-Dex

3.2.1 Tratamiento de los datos

Según las recomendaciones del (ETCCDI/CRD, 2011), para determinar los índices de cambio climático, es necesario contar con estaciones que entreguen datos diarios y que además contengan las variables de precipitación, temperaturas máximas y temperaturas mínimas. Las estaciones del INAMHI que cumplían estos requerimientos en el DMQ y sus alrededores (50 km a la redonda), se detallan en la Tabla 3.

Sobre cada matriz de datos entregada por el INAMHI se le generó un autómata (script) sobre lenguaje bash en sistema operativo Centos, con el objetivo de preparar los datos para su tratamiento estadístico, siguiendo los Manuales de Usuario de R-Climindex (Santos, 2004; Zhang & Yang, 2004).

Tabla 3. Estaciones meteorológicas con datos diarios seleccionadas para el estudio por contar con las variables meteorológicas requeridas: precipitación (rr), temperatura máxima (tx) y temperatura mínima (tn).

Estación	Código Estación	Latitud	Longitud	Altitud [msnm]	Desde	Hasta	Rango Temporal [años]	Variables meteorológicas disponibles
Izobamba	M003	0°22'S	78°33'W	3058	1964	2011	47	rr, tn, tx
Papallacta	M188	0°21'54"S	78°8'41"W	3150	1963	2011	48	rr, tn, tx
Tomalón-Tabacundo	MA2T	0°2'N	78°14'W	2790	1990	2011	21	rr, tn, tx
Cotopaxi-Clirsen	M120	0°37'24"S	78°34'53"W	3510	1964	2011	47	rr, tn, tx

Tabla 4. Estaciones meteorológicas con datos mensuales seleccionadas para el estudio por contar con un rango temporal apropiado (aproximadamente 30 años o más). Las variables meteorológicas estudiadas son precipitación (rr), temperatura máxima (tx) y temperatura mínima (tn).

	Estación	Código Estación	Latitud	Longitud	Desde	Hasta	Rango Temporal [años]	Altitud [msnm]	Variables
1	IZOBAMBA	M003	0°22'S	78°33'	1962	2011	49	3058	rr,tx,tn n, ev, hr, he
2	PAPALLACTA	M188	0°21'54"S	78°8'41"	1950	2011	61	3150	rr,tx,tn n, ev, hr, he
3	COTOPAXI-CLIRSEN	M120	0°37'24"S	78°34'53"	1956	2011	55	3510	rr,tx,tn n, hr, he
5	CUYUJA	M436	0°25' S	78°2' 58"	1982	2011	29	2380	rr
6	GUAYTACAMA	M365	0°49'14"S	78°38'25"	1951	2011	60	3075	rr
7	LAS PAMPAS	M362	0°25'32"S	78°57' 54"	1965	2011	46	1583	rr
8	CAYAMBE	M359	0°3'14"N	78°8'22"	1976	2011	35	2840	rr
9	RUMIPAMBA-PICHINCHA	M353	0°25'39"S	78°24'57"	1964	2011	47	2940	rr
10	HDA.LA GRANJA-ALOAG	M350	0°28'35"S	78°39'12"	1963	1994	31	3100	rr
12	PUEMBO	M347	0°10'34"S	78°21'21"	1963	1996	33	2460	rr
13	YARUQUI INAMHI	M346	0° 9'35"S	78 °18'55"	1963	2011	48	2600	rr
14	CANGAHUA	M344	0°3'26"S	78°10'2"	1963	2011	48	3140	rr
15	EL QUINCHE-PICHINCHA	M343	0° 6'8"S	78°18'12"	1963	2011	48	2605	rr
16	COTOCOLLAO	M342	0°5'50"S	78°29'41"	1950	1986	36	2720	rr
17	SAN JOSE DE MINAS	M337	0°10'8"N	78°23'35"	1964	2011	47	2440	rr
18	LA CHORRERA	M335	0°12'6"S	78°32' 6"	1977	2011	34	3165	rr
19	CHONTAL BAJO	M327	0°14'14"N	78°44'57"	1967	2011	44	675	rr
20	EL REFUGIO-COTOPAXI	M121	0°39'33"S	78°34'40"	1973	2000	27	4020	rr
21	OLMEDO-MANABI	M116	1°23'41"S	80°12'25"	1950	2011	61	50	rr
22	SAN ANTONIO DE PICHINCHA	M115	0°0' 37"S	78°26'13"	1956	1997	41	2430	rr
23	TUMBACO	M114	0°14'S	78°24'50"	1964	2003	39	2348	rr
24	UYUMBICHO	M113	0°23'18"S	78°31'1"	1962	2011	49	2740	rr
25	MALCHINGUI INAMHI	M111	0°3'20" N	78°19'56"	1963	2006	43	2840	rr

3.2.2 Control de calidad y visualización de los índices

Aunque se requiere que los datos entregados estén ya homogenizados y con un control de calidad previo, RClimDex realiza un nuevo control de calidad como prerrequisito para el cálculo de los índices. Este consta en reemplazar todos los datos faltantes (codificados como -99,9) en un formato interno que reconoce R y a continuación reemplaza todos los valores no razonables por NA. Por ejemplo: cantidades de precipitaciones diarias menores que cero y temperaturas máximas diarias menores que las temperaturas mínimas diarias. Adicionalmente, este control de calidad también identifica valores extremos (*outliers*) en temperaturas diarias máximas y mínimas. Los valores extremos son valores diarios que se encuentran fuera de una región definida por el usuario. Actualmente esta región se define como n veces la desviación estándar del valor del día, esto es, $[\text{media}-n*\text{std}, \text{media}+n*\text{std}]$. Donde std representa la desviación estándar para el día y n es una entrada del usuario. En este estudio se ha definido $n=3$. Para propósitos de visualización, se graficaron series anuales, junto con tendencias calculadas por regresión lineal de mínimos cuadrados y regresión lineal con ponderamientos locales (Santos, 2004).

4. Resultados y discusión

4.1 Incremento general de la temperatura en el DMQ

El análisis de las variaciones de la temperatura a través de estudios regionales, muestran un incremento positivo de la temperatura en la región (Vuille *et al.*, 2008 citado en Villacís *et al.*, 2012), además se ha encontrado un incremento de una décima de grado por década en los Andes (Martínez *et al.*, 2009) y un incremento general en toda América Latina (Samaniego *et al.*, 2009). En el país, se ha evidenciado el incremento de la temperatura en las cuatro regiones del Ecuador (Nieto *et al.*, 2002), (Cáceres, 1998) y estudios locales sobre el DMQ (Zambrano-Barragán *et al.*, 2010; Villacís, 2008), pone en evidencia un aumento de la temperatura anual de $0,12^{\circ}\text{C}/\text{década}$ en un periodo de 100 años. Es decir, que se puede afirmar positivamente que el DMQ experimenta un incremento general de la temperatura. Asimismo, Villacís muestra que el incremento en los últimos quin-

ce años de la serie estudiada (1963-2006) presentaba un incremento de aproximadamente $0,4^{\circ}/\text{año}$ respecto al comportamiento promedio de la serie completa. Además, se muestra la correspondencia directa entre las variaciones mensuales de temperatura y la temperatura superficial del Pacífico, determinada por ENSO.

De esta manera, se eligieron los datos de aquellas estaciones que presenten tendencias con una significancia superior al 80%. Y con datos temporalmente representativos (aproximadamente 30 años o más). Este análisis se realizó para las variables de Temperaturas mínimas (Tabla 5), Temperaturas máximas (Tabla 6), precipitación (Tabla 7), evaporación potencial (Tabla 8), heliofanía efectiva mensual (Tabla 9), humedad relativa mensual (Tabla 10) y nubosidad media mensual (Tabla 11).

4.2 Tendencias graduales de la precipitación

El incremento de las temperaturas mínimas es congruente con los resultados en unciados en la sección 4.1. Asimismo, Izobamba presenta tendencia al aumento de temperaturas tanto máximas como mínimas, ya que en esta estación se puede tomar en cuenta el efecto de "isla de calor" (Hogan, 2010) debido al cambio de uso de suelo por la urbanización de la zona. La Estación de Cotopaxi, la significancia estadística no fue suficiente para concluir una tendencia en el comportamiento de la temperatura.

En cuanto al comportamiento en tendencias de precipitación, es difícil establecer un patrón en el comportamiento en función de la altura, o la ubicación geográfica de las estaciones. Aunque los cambios a diez años oscilan entre 1 mm y los 8 mm, se reconocen cambios importantes para los sectores de Rumipamba en donde se registra un incremento de 18,63 mm por cada diez años, y en la Chorrera en donde el incremento llega a ser de 13,4 por cada diez años. Es clara la necesidad de contar con una mayor resolución temporal ya que los eventos que se registran son únicamente promedios mensuales.

Este comportamiento aunque puede parecer desorientador, no contradice los posibles efectos del cambio climático, en los cuales se menciona que los comportamientos graduales de la precipitación pueden incrementarse como disminuir, pero que debe evidenciarse un aumento de eventos extremos (IPPC, 2007). Este último análisis se realiza en la sección 5.

Tabla 5. Cambios de temperatura mínima por estación meteorológica.

Estación	Código Estación	Latitud	Longitud	Rango Temporal [años]	Altitud [msnm]	Incremento [°/año]	Probabilidad %
IZOBAMBA	M003	0°22'S	78°33'	49	3058	0,0186	89,9
PAPALLACTA	M188	0°21'54"S	78°8'41"	61	3150	0,0109	96,38

Tabla 6. Cambios de temperatura máxima por estación meteorológica.

Estación	Código Estación	Latitud	Longitud	Rango Temporal [años]	Altitud [msnm]	Incremento [°/año]	Probabilidad %
IZOBAMBA	M003	0°22'S	78°33'	49	3058	0,0114	91,54
PAPALLACTA	M188	0°21'54"S	78°8'41"	61	3150	0,0378	57,53

Adicionalmente, Villacís *et al.* (2012) realizan un análisis estacional de las variaciones de estas tendencias sobre los años de 1963 a 2006 y de 1991 a 2006, encontrando que en el último período de quince años, las tendencias adoptan un comportamiento anómalo en los meses de marzo y agosto. Este estudio fue llevado a cabo sobre los datos ubicados en la cuenca del río San Pedro.

De esta manera, se toman los datos sobre la misma cuenca para realizar un análisis más detallado acerca del comportamiento de las tendencias sobre los meses de marzo y agosto. Los resultados se presentan en la Figura 3, con los que se confirma la anomalía sobre los dos meses estudiados. Se puede ver que la tendencia positiva que presentaba el mes de marzo (etapa invernal) en la que aumentaba 0,25 mm/año, invierte su comportamiento desde 1991 llegando a disminuir 0,99 mm/año. En lo que se refiere a agosto, mes correspondiente a período de verano en el DMQ, la tendencia iba a la alza pero en un

monto más modesto de 0,12 mm/año; pero después de 1991 sube abruptamente a 1,27 mm/año. Villacís *et al.* (2012) responsabilizan este cambio de estacionalidad a eventos con gran período de retorno como la PDO.

4.3 Tendencias graduales en evaporación potencial, nubosidad y heliofanía

Al analizar la evaporación potencial (Tabla 8) y la humedad relativa (Tabla 9), variables relacionadas con la humedad disponible a nivel del suelo, se aprecia que la significancia estadística no fue suficiente para generar una conclusión acerca del comportamiento de la mayoría de las variables. Sin embargo, la ligera tendencia que muestran ambas a la disminución se pueda deber al cambio de uso de suelo debido a la urbanización de las zonas estudiadas.

Tabla 7. Cambios de precipitación por estación meteorológica. Se muestra la tendencia al incremento o al decremento en la serie de tiempo estudiada mostrando la correspondiente significancia estadística.

Estación	Código Estación	Latitud	Longitud	Rango Temporal [años]	Incremento [°/año]	Probabilidad %
IZOBAMBA	M003	0°22'S	78°33'	49	0,2585	99,64
PAPALLACTA	M188	0°21'54"S	78°8'41"	61	-0,7744	57
COTOPAXI-CLIRSEN	M120	0°37'24"S	78°34'53"	55	0,1297	94,16
CUYUJA	M436	0°25' S	78°2' 58"	29	-0,3899	92,6
GUAYTACAMA	M365	0°49'14"S	78°38'25"	60	-0,263	76,36
LAS PAMPAS	M362	0°25'32"S	78°57'54"	46	-0,0976	98,75
CAYAMBE	M359	0°3'14"N	78°8'22"	35	0,7329	98,16
RUMIPAMBA-PICHINCHA	M353	0°25'39"S	78°24'57"	47	1,863	95,57
HDA.LA GRANJA-ALOAG	M350	0°28'35"S	78°39'12"	31	-0,7512	97,71
PUEMBO	M347	0°10'34"S	78°21'21"	33	-0,7195	97,22
YARUQUI INAMHI	M346	0° 9'35"S	78 °18'55"	48	-0,2234	95,17
CANGAHUA	M344	0°3'26"S	78°10'2"	48	-0,3	66,88
EL QUINCHE-PICHINCHA	M343	0° 6'8"S	78°18'12"	48	-1,136	21,3
COTOCOLLAO	M342	0°5'50"S	78°29'41"	36	-0,602	11
SAN JOSE DE MINAS	M337	0°10'8"N	78°23'35"	47	0,1822	98,61
LA CHORRERA	M335	0°12'6"S	78°32' 6"	34	1,334	82,63
CHONTAL BAJO	M327	0°14'14"N	78°44'57"	44	0,6658	89,98
EL REFUGIO-COTOPAXI	M121	0°39'33"S	78°34'40"	27	-0,8614	84,86
SAN ANTONIO DE PICHINCHA	M115	0°0' 37"S	78°26'13"	41	-0,012	99,13
TUMBACO	M114	0°14'S	78°24'50"	39	-0,6232	98
UYUMBICHO	M113	0°23'18"S	78°31'1"	49	-0,6124	95,14
MALCHINGUI INAMHI	M111	0°3'20" N	78°19'56"	43	-0,6043	75,28

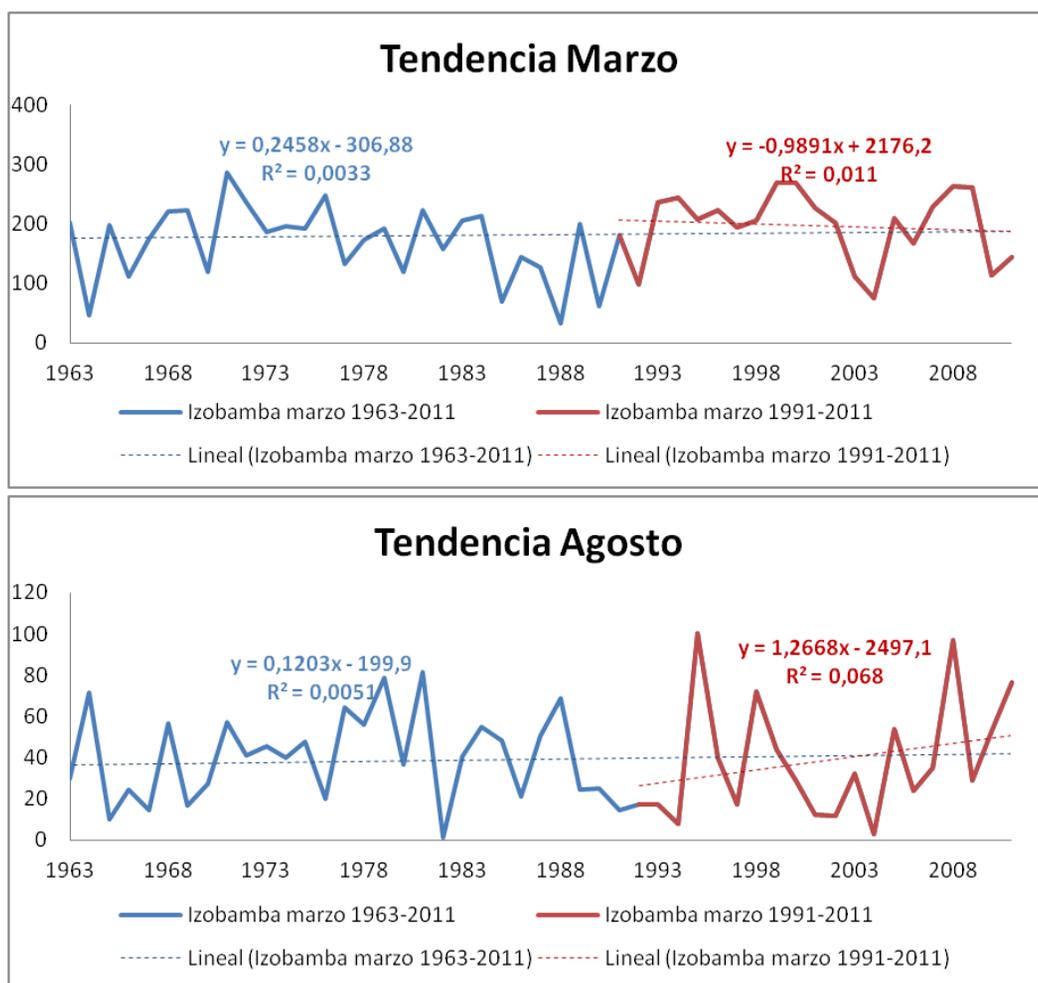


Figura 3. Cambios en la tendencias registradas sobre la cuenca del río San Pedro para los meses de marzo y agosto. La serie de datos inicia en 1963 y finaliza en el 2011, el cambio de tendencia se da a partir de 1991.

Tabla 8. Cambios en la evaporación potencial por estación meteorológica.

Estación	Código Estación	Latitud	Longitud	Rango Temporal [años]	Altitud [msnm]	Incremento [mm/año]	Probabilidad %
IZOBAMBA	M003	0°22'S	78°33'	34	3058	-0,2963	30,63
PAPALLACTA	M188	0°21'54"S	78°8'41"	6	3150	-3,143	57,61

Tabla 9. Cambios en la humedad relativa mensual por estación meteorológica.

Estación	Código Estación	Latitud	Longitud	Rango Temporal [años]	Altitud [msnm]	Incremento [%/año]	Probabilidad %
IZOBAMBA	M003	0°22'S	78°33'	29	3058	-0,0355	91,53
PAPALLACTA	M188	0°21'54"S	78°8'41"	48	3150	-0,1029	40,96

Otro par de variables relacionadas son la heliofanía efectiva y la nubosidad media mensual, ya que el incremento de la primera variable implica inmediatamente el decremento de la segunda. Asimismo, aunque la significancia estadística no es suficiente como para generar una afirmación, se observa una

ligera disminución de la heliofanía en las estaciones que se encuentran en la zona sur del DMQ: Papallacta y Cotopaxi-Clirsen, y un consecuente aumento de la nubosidad. Este efecto se puede atribuir a la dirección de los vientos del norte que arrastran las masas nubosas al sur.

Tabla 10. Cambios en la heliofanía efectiva mensual por estación meteorológica.

Estación	Código Estación	Latitud	Longitud	Rango Temporal [años]	Altitud [msnm]	Incremento [%/año]	Probabilidad %
IZOBAMBA	M003	0°22'S	78°33'	49	3058	-0,0856	97,32
PAPALLACTA	M188	0°21'54"S	78°8'41"	4	3150	-0,60875	93,39
COTOPAXI-CLIRSEN	M120	0°37'24"S	78°34'53"	32	3510	-0,5565	89,83

Tabla 11. Cambios en la nubosidad media mensual por estación meteorológica.

Estación	Código Estación	Latitud	Longitud	Rango Temporal [años]	Altitud [msnm]	Incremento [octas/año]	Probabilidad %
IZOBAMBA	M003	0°22'S	78°33'	29	3058	0,0177	61,8
COTOPAXI-CLIRSEN	M120	0°37'24"S	78°34'53"	52	3510	0,0087	53,74

5. Índices de cambio climático resultantes de datos diarios

De las cuatro estaciones estudiadas, Cotopaxi-Clirsen, Papallacta y Tomalón Tabacundo, contaban con un 25 % de datos faltantes, lo cual impidió el cálculo de algunos índices. Los incrementos (pendientes) de los índices calculados se presentan por

separado en cuanto a tablas de temperaturas (Ver Tabla 12, Figuras 4 y 5). Así como los índices de precipitación en la Tabla 13 y Figura 6.

5.1 Extremos de temperatura en el DMQ

En la Figura 4, se muestra el incremento de los valores máximos de Temperaturas Máximas anuales (TXx) –logradas en los días– y Temperaturas Mí-

nimas anuales (TNx) –logradas en las noches–. Se aprecia como el incremento de temperaturas máximas es mayor en la zona noreste del DMQ representado por la estación de Tomalón-Tabacundo, éste comportamiento se puede deber al tipo de cobertura vegetal que es significativamente menor al encontrado en la región sur del DMQ, es decir, que la escasez de vegetación de la zona nororiental impide un reciclaje de humedad, que determina una menor inercia térmica y que por lo tanto se traduce en mayores variaciones de temperatura. Se aprecia claramente cómo el mayor incremento se obtiene para la variable de temperatura máxima anual para la estación de Tabacundo, ya que es más sensible a la exposición solar, incrementando de manera más rápida la temperatura diurna. A este efecto hay que sumarle la acción de los vientos que traslada las masas húmedas hacia el Sur, intensificando así este comportamiento.

En contraste la zona sur, representada por las estaciones de Papallacta e Izobamba, a pesar de evidenciar un incremento de temperatura posee más vegetación, lo cual determina que estos incrementos sean más suaves (mayor capacidad calorífica-inercia térmica).

Al analizar los ponderamientos locales (líneas punteadas) se aprecia que existe un quiebre alrededor de los años de 1980 que marca un incremento generalizado, tanto de temperaturas máximas anuales como de temperaturas mínimas anuales.

Así, la regresión lineal por el método de los Mínimos cuadrados muestra que las tendencias lineales (Tabla 12) para las temperaturas máximas son de $0,1^{\circ}\text{C}$, $0,3^{\circ}\text{C}$ y $1,25^{\circ}\text{C}$ de aumento por cada 10 años, para las estaciones de Izobamba, Papallacta y Tomalón-Tabacundo; en esta última estación ubicada al Norte del DMQ, se aprecia no sólo un incremento acelerado de las temperaturas máximas, sino también del índice de días tropicales ($SU_{25}=0,303$, con un valor p de 0,003) es decir, que el número de días con temperaturas mayores a 25°C van aumentando en un orden de 1 día por año.

Las tendencias para las temperaturas mínimas se presentan en los mismos órdenes, oscilando entre los $0,3^{\circ}\text{C}$ a $0,67^{\circ}\text{C}$ grados por cada 10 años. Significativamente estadísticas para las estaciones de Papallacta, Tomalón-Tabacundo e Izobamba (Tabla 12). En cuanto a esta última estación, cabe indicar que logra la mayor cantidad de índices de cambio climático ya que es la que consta de mayor cantidad de datos disponibles respecto a las otras estaciones. Registrando así un calentamiento general, ya que aunque sus noches frías (T_{n10p} temperatura mínima bajo el percentil 10) disminuyen ligeramente en una proporción de 4 por cada 100 años, los valores que de estas temperaturas mínimas que superan el percentil 90 T_{n90p} han aumentado en un 7% por década, los días cálidos (T_{x90p} temperatura máxima sobre el percentil 90) aumentan de 2% cada 10 años.

Asimismo, en la Figura 5 (izquierda) se aprecia el comportamiento del Rango Diurno de Temperatura (DTR), que se determina como la diferencia entre temperaturas máximas y mínimas en un día. Se aprecia como en el sur del DMQ las temperaturas mínimas aumentan más rápido que las máximas, generando una disminución del DTR, en proporciones de 1°C a 2°C por cada 100 años (Tabla 13). Mientras que para el norte del DMQ, en donde las temperaturas máximas han incrementado mucho más rápido que las mínimas el DTR aumenta en 8° cada 100 años.

Finalmente, el comportamiento de los Días Secos Consecutivos al Año (CDD), ubicado a la derecha de la Figura 5, tiene un comportamiento con un último quiebre que indica una disminución general de este índice –al menos con la serie de datos estudiados que va hasta 2011–, este comportamiento podría indicar que los períodos de sequía en el DMQ han ido disminuyendo o puede atribuirse a un comportamiento oscilante asociado al fenómeno de la PDO (Espinoza *et al.*, 2009) ya que la ausencia de significancia estadística, parece indicar que no existe una tendencia lineal ya sea al incremento o al decremento.

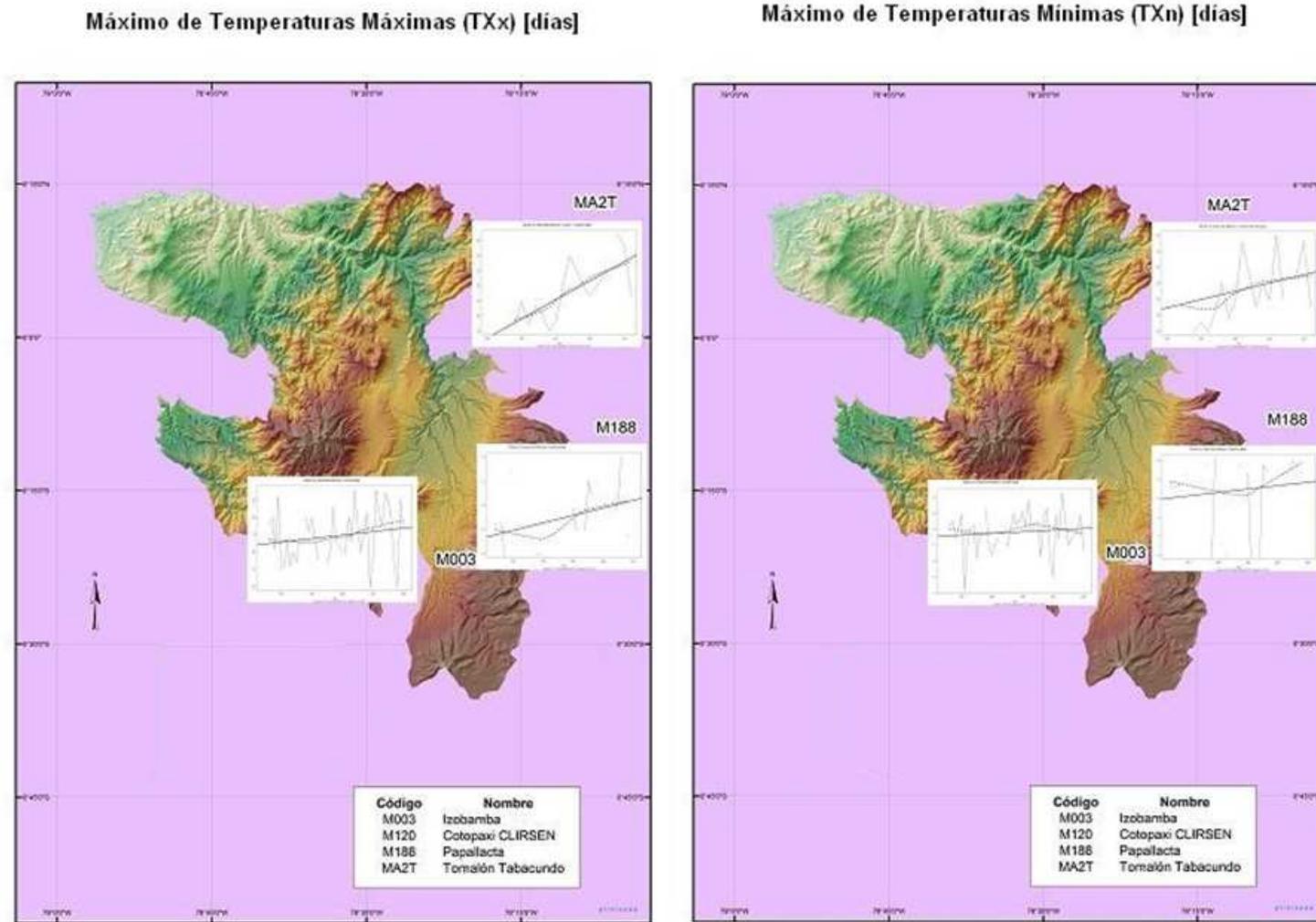


Figura 4. (der.) Tendencias de los valores máximos de temperaturas máximas anuales e (izq.) Tendencias de los valores máximos de temperaturas mínimas anuales. En ambos gráficos se evidencia un aumento incremento interanual de estos máximos anuales, el cual es mayor en las zonas con menor cobertura vegetal. Elaboración: Pedro Araujo.

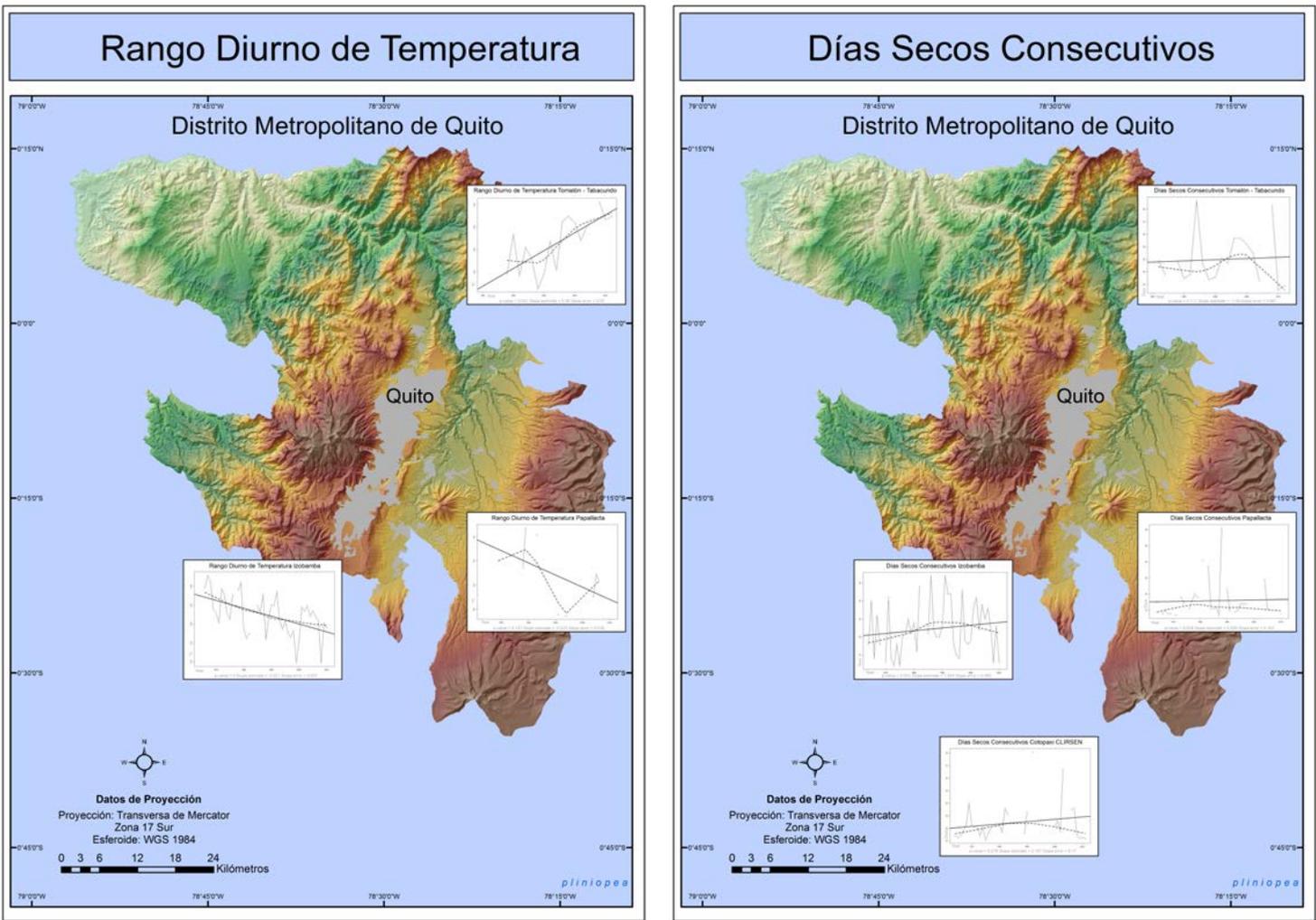


Figura 5. (der.) Tendencias de los valores máximos de temperaturas máximas anuales (izq.) Tendencias de los valores máximos de temperaturas mínimas anuales. En ambos gráficos se evidencia un aumento incremento interanual de estos máximos anuales, el cual es mayor en las zonas con menor cobertura vegetal. Elaboración: Pedro Araujo.

Tabla 12. Tendencias anuales de cada indicador de cambio climático para las temperaturas, logradas con R-Climdex para las cuatro estaciones del DMQ y sus alrededores. Los valores con asterisco corresponden a aquellas series con significancia estadística superior al 80 % ($0,2 \geq p$).

ÍNDICE	Izobamba M003	Cotopaxi- Clirsen M121	Papallacta M188	Tomalón -Tabacundo MA2T
Valor mensual máximo de temperatura mínima diaria [°C/año] (TNx)	0,03*	0,095	0,067*	0,051
Valor-p	0	0,404	0,033	0,243
Valor mensual máximo de temperatura máxima diaria (TXx) [°C/año]	0,01*	—	0,031*	0,125*
Valor-p	0,2	—	0,11	0,001
Rango Diurno de temperatura Tx-Tn [°/año] (DTR)	-0,021*	—	-0,025*	0,08*
Valor-p	0,003	—	0,147	0,001
Días secos consecutivos [día/año] (CDD)	0,076*	0,187	0,029	0,187
Valor-p	0,33	0,279	0,858	0,817
Noches cálidas: días cuando la temperatura mínima pasa el percentil 90 [%/año] (TN90P)	0,683*	—	—	—
Valor-p	0	—	—	—
Días cálidos: días con temperatura máxima sobre el percentil 90 [%/año] (TX90P)	0,205*	—	—	—
—	0,054	—	—	—
Días Tropicales (Tx>25°) [día/año] SU25	—	—	—	1,063*
Valor-p	—	—	—	0,003

5.2 Valores extremos de precipitación en el DMQ

La Figura 6 muestra que el efecto del transporte de las masas de aire húmedo por los vientos con dirección norte-sur, y la cobertura vegetal mayoritaria en el sur, propicia un incremento generalizado de precipitaciones intensas (R95p) y extremas (R99P) al sur y sureste del DMQ, mientras que al norte y al este del DMQ, esta tendencia disminuye.

Al igual que para el caso de la temperatura, el análisis de ponderamientos locales (líneas punteadas) muestra un quiebre alrededor de los años 80 que marca un incremento general de los eventos extremos. Sobre todo en las estaciones de Tomalón-Tabacundo y Cotopaxi-Clirsen, las cuales tienen en común una menor humedad relativa, en el primer caso, debido al tipo de cobertura vegetal de la zona y en el segundo debido a la gran altitud de la estación. Esta reducción de la capacidad calorífica, muestra la sensibilidad aumentada en los eventos posteriores a los años de 1980.

En cuanto a las tendencias de aumento de la frecuencia de los días lluviosos, (Tabla 13), se aprecia que para la estación de Izobamba, existe una tendencia prácticamente regular de que cada 10 años, exista 1,8 días más de precipitación intensa (mayor a 10 mm/día, R10mm), y 1,36 días más cada diez años precipitación muy intensa (mayor a 20 mm/día) y de precipitación extremadamente intensa (30 mm/día). Para la estación del Clirsen, ubicada al sur de Izobamba, se tienen los mismos resultados pero disminuidos a la mitad, es decir con una tendencia de medio día, por cada 10 años. Cabe indicar que estas tendencias, aunque sólidas estadísticamente, muestran un incremento en la frecuencia de eventos lluviosos extremos muy pequeño.

Sin embargo, en cuanto a la intensidad de las lluvias extremas se tienen otros resultados ya que las lluvias intensas (sobre el percentil 95), tienden a aumentar en una magnitud de 3,6 mm/año tanto para la estación de Izobamba como para la del Clirsen. Mientras que al Norte se aprecia el comportamiento opuesto, la lluvia intensa disminuye en 2,9

mm al año. En cuanto a la lluvia muy intensa (sobre el percentil 99), se aprecia un incremento de 1,854 mm/año y de 1,526 mm/año para Izobamba y Clirsen, y un decremento de 1,39 mm/año para el norte del DMQ. Asimismo, si estudiamos el Índice de Intensidad Diaria (SDII), el cual determina cuánto aumenta la lluvia de un día, al año, se aprecia un incremento significativo únicamente para la estación de Izobamba, registrando un aumento de 2,7 mm al día para cada 100 años.

6. Conclusiones y Recomendaciones

En primer lugar, al tratarse en este estudio dos técnicas diferentes, es importante hacer hincapié en las

diferencias de estos resultados. En el análisis de datos mensuales, a pesar de ser una técnica bastante practicada (Martínez *et al.*, 2009), (Lavado *et al.*, 2010), no se aprecian tendencias con suficiente significancia estadística, además se invisibilizan los eventos extremos, cuya duración suele ser infradiaria. De esta manera se recomienda trabajar de manera más frecuente con datos diarios e inclusive horarios, a pesar del esfuerzo que conlleve a los SMHN (Crowley y North, 1988).

El aumento de GEI registrado en el mundo (IPCC, 2007), responsable de lo que ahora denominamos cambio climático, genera incremento general de la temperatura, un patrón irregular y cambiante de las precipitaciones y un incremento de los eventos extremos. En este estudio, estas tres características han sido encontradas.

Tabla 13. Tendencias anuales de cada indicador de cambio climático en precipitación, logrados con R-Climdex para las cuatro estaciones del DMQ y sus alrededores. Los valores con * implican una significancia superior al 90 % ($p < 0,2$).

ÍNDICE	Izobamba	Cotopaxi- Clirsen	Papallacta	Tomalón - Tabacundo
	M003	M121	M188	MA2T
Días al año con precipitación intensa (mayor a 10mm/día) [días/año] (R10mm)	0,16*	0,049	-0,063	-0,037
Valor-p	0,135	0,756	0,796	0,863
Días al año con precipitación muy intensa (mayor a 20mm/día) (R20mm) [días/año]	0,135* 0,057* -0,127	-0,137*		
Valor-p	0,005	0,038	0,464	0,028
Días al año con precipitación extrema(mayor a 30mm/día) [días/año] (R30mm)	0,091*	0,052*	-0,13	-0,049*
Valor-p	0,003	0,001	0,359	0,185
Días muy lluviosos (precipitación sobre el percentil 95) [mm/año] (R95p)	3,65*	3,679*	-6,084	-2,971*
Valor-p	0	0	0,371	0,144
Días extremadamente lluviosos (precipitación sobre el percentil 99) [mm/año] (R99p)	1,896*	1,526*	-4,285	-1,39*
Valor-p	0,002	0,002	0,278	0,177
Índice de intensidad diaria [mm/día/año] (SDII)	0,027*	0,007	-0,037	-0,014
Valor-p	0	0,523	0,405	0,584

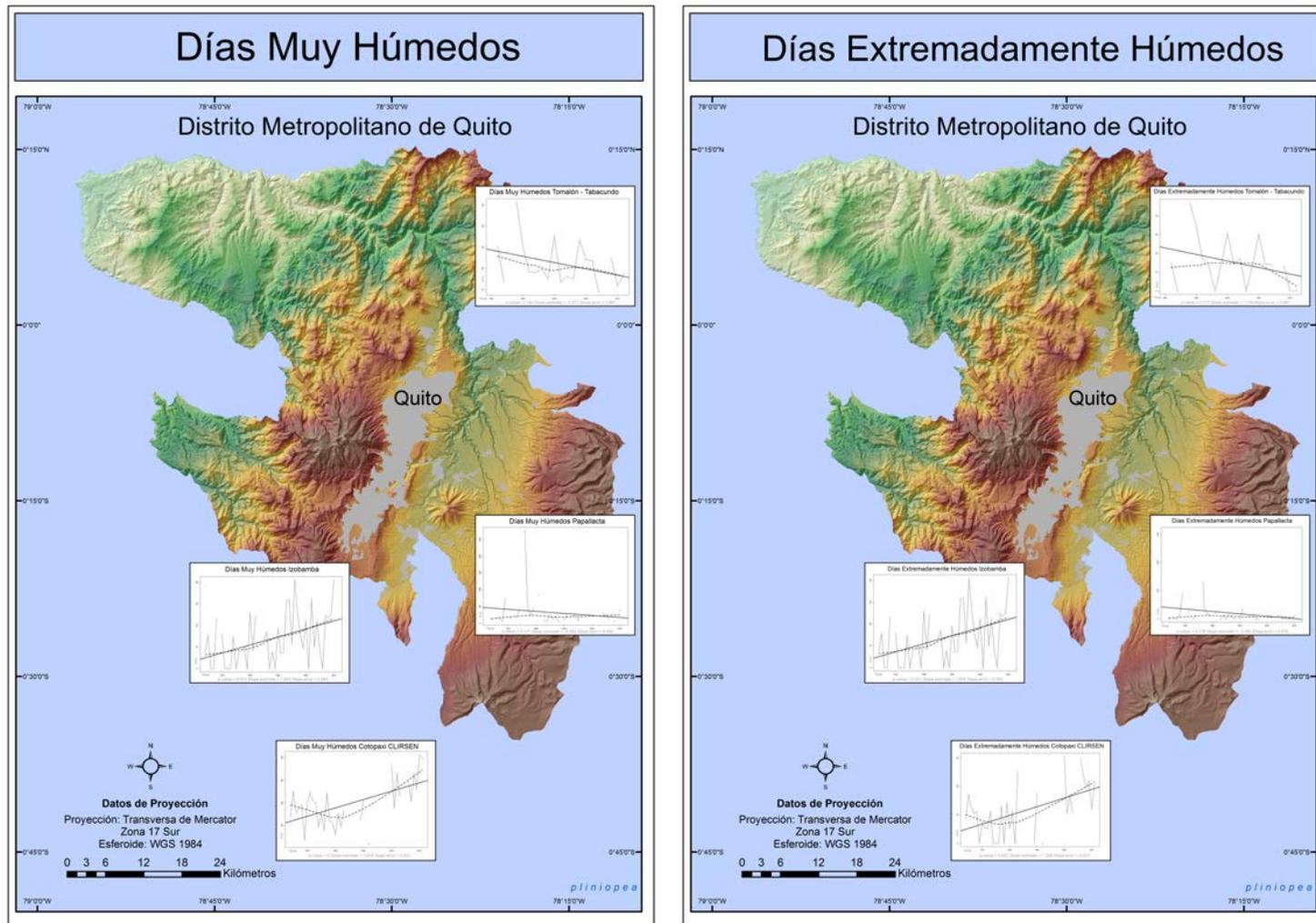


Figura 6. (der.) Días muy lluviosos con precipitaciones medidas en mm, que superan al percentil 95 (R95p) (izq.) Días extremadamente lluviosos con precipitaciones anuales medidas en mm, que superan al percentil 99 (R99p). En ambos gráficos se evidencia un incremento de las precipitaciones intensas en la zona sur, mientras que existe un decremento al norte. Elaboración: Pedro Araujo.

Por un lado se ha comprobado el incremento gradual de la región y del DMQ a través de este y de múltiples estudios (Vuille *et al.*, 2008 citado en Villacís *et al.*, 2012), (Martínez *et al.* 2011), (Samaniego *et al.*, 2009), (Nieto *et al.*, 2002), (Cáceres, 1998), (Zambrano-Barragán *et al.*, 2010), (Villacís, 2008) y (Villacís *et al.*, 2012). Asimismo, se pone en evidencia el comportamiento irregular de la precipitación, en el cual existen cambios inclusive en su estacionalidad mostrando las mayores anomalías en los meses de marzo y agosto. Sin embargo, cabe indicar que estos cambios se pueden deber más a la variabilidad climática como es la PDO, que tiene períodos de retorno de 20 a 30 años, aunque no hay que descartar una posible influencia del cambio climático sobre este fenómeno.

En lo que se refiere al estudio de eventos extremos, la evidencia de su incremento es suficientemente sólida estadísticamente, además, el estudio de ponderamientos locales que muestra quiebres alrededor de los años de 1980, mostrando un incremento de los comportamientos extremos en los últimos 30 años que coincide con el aumento general registrado de la temperatura debido a la presencia de los GEI. Aunque hay que sumar estos efectos atribuidos al cambio climático, a aquellos producidos por la urbanización en el DMQ la cual generó un importante cambio en el uso de suelo y por lo tanto el efecto de "isla de calor" que contribuye al aumento de las temperaturas, sobre todo a las nocturnas (temperaturas mínimas), ya que la superior capacidad calorífica del asfalto, hace que el calor se desprenda de este material durante las noches.

Asimismo, al estudiar el comportamiento de los valores máximos de temperaturas máximas, se hace evidente que zonas con poca vegetación y por lo tanto con menos humedad disponible, se han visto más afectadas a los incrementos extremos de temperatura, como es el caso de la zona nororiental del DMQ.

El efecto de los mayoritarios vientos del norte que arrastran las masas de agua hacia el sur, en donde se ha evidenciado un aumento de lluvias intensas y extremas, así como de nubosidad, muestra un comportamiento que parece incrementarse en el tiempo. No tanto en la frecuencia de las lluvias extremas, más sí en su intensidad; mientras en las zonas del nororiente, se aprecia el comportamiento contrario.

En cuanto al número de días secos consecutivos no se ha evidenciado ninguna tendencia ni al incremento ni al decremento, más bien parece ser que este índice tiene un comportamiento oscilante, posiblemente producto a la influencia de la PDO (Espinoza *et al.*, 2009) u a otro factor de variabilidad climática con grandes períodos de retorno.

Una recomendación final sería la de generar una nueva concepción física, con su correspondiente aparato teórico que defina de mejor manera los comportamientos extremos, en este caso existe evidencia que el número de precipitaciones intensas aumenta con el aumento de vapor de agua como una ley de potencia, que viene de la teoría de las transiciones de fase continuas y la criticalidad auto-organizada (Peters y Neellin, 2006; Serrano y Basile, 2012), estas nuevas teorías pueden dar luces de cómo se comportan estos eventos emergentes que escapan de las predicciones de los modelos dinámicos y de mesoescala (Palacios y Serrano, 2010).

7. Agradecimientos

La presente investigación fue financiada por la Climate Development Knowledge Network-CDKN dentro del "Estudio de Vulnerabilidad del DMQ". Y fue realizada bajo el esfuerzo conjunto del Stockholm Environment Institute-SEI, la Red de Universidades Frente al Cambio Climático y Gestión de Riesgos representada por la Escuela Politécnica Nacional-EPN, la Pontificia Universidad Católica del Ecuador-PUCE y el Centro de Investigación en Modelamiento Ambiental- CIMA-UPS de la Universidad Politécnica Salesiana. Además de las ONGs, Corideas y Ecociencias. Asimismo, se agradece la gestión y validación de productos de la Secretaría del Ambiente del Ilustre Municipio del Distrito Metropolitano de Quito.

Referencias

Castillo, N. I. y B. E. Espinoza. 2009. **Análisis e interpretación de la información histórica del clima en el estado puebla por medio de los programas rclimindex y rhctest.** URL <http://zimbra.ine.gob.mx/pdcc/pdccweb/ws2pdfs/15-ItzelCastillo-Pue.pdf>.

- Cáceres, L., G. Mejía y Ontaneda. 1998. **Evidencias del cambio climático en Ecuador**. Bull. Inst. fr. Études andines, 27(3): 547–556.
- CMNUCC. 1987. **Convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático, protocolo de montreal**.
- Comunicación Nacional República del Ecuador. 2001. **Convención Marco de las Naciones Unidas, Cambio Climático**. Comité Nacional sobre el Clima. Ministerio del Ambiente.
- Cornell University. 2009a. **Microclimates**. URL <http://www.gardening.cornell.edu/weather/microcli.html>.
- Cornell University. 2009b. **Microclimates**. URL <http://www.gardening.cornell.edu/weather/microcli.html>.
- Crowley, T. y G. North. 1988. **Abrupt climate change and extinction events in earth history**. Science, págs. 996–1002.
- ESPERE. 2008. **Atmosférica global**. Environmental Science Published for Everybody Round the Earth, URL http://www.atmosphere.mpg.de/enid/2_Sistemas_de_circulaci_n/Circulaci_n_global_3bg.html.
- Espinoza, J. C., J. Ronchail, J. L. Guyot, G. Cochonneau, F. Naziano, W. Lavado, E. D. Oliveira, R. Pombosa y P. Vauchel. 2009. **Spatio-temporal rainfall variability in the amazon basin countries (brazil, peru, bolivia, colombia, and ecuador)**. International Journal of climatology, (DOI: 10.1002/joc.1791).
- ETCCDI/CRD. 2011. **Climate change indices**. URL <http://ccma.seos.uvic.ca/ETCCDI/index.shtml>.
- Folland, C., P. Frich, T. Basnett, N. Rayner, D. Parker y B. Horton. 2000. **Uncertainties in climate data sets - a challenge for wmo**. WMO Bulletin.
- Frich, P. 1999. **REWARD—A Nordic Collaborative Project. Annex of Meeting of the Joint CCI/CLIVAR Task Group on Climate Indices, Bracknell, UK, 2-4 September 1998**. World Climate Data and Monitoring Programme.
- Hogan y Cleveland. 2012. **Microclimate**. Encyclopedia of Earth, Washington, D.C.: Environmental Information Coalition, National Council for Science and the Environment, first published in the Encyclopedia of Earth November 16, 2010; Last revised Date August 21.
- IPCC. 1995. **Climate change 1995, the science of climate change**. Cambridge University Press, pág. 572.
- IPCC. 2007. **Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Core Writing Team, Geneva, Switzerland, pág. 104.
- Jiménez, T. 2007. **Tendencias del clima en el salvador**. Minerva Revista en Línea CIC-UES, págs. 1–11.
- Karl, T., N. Nicholls y A. Ghazi. 1999. **CLIVAR/gcos/wmo workshop on indices and indicators for climate extremes: Workshop summary**. Climatic Change, 42: 3–7.
- Lavado, W., D. Labat, J. Ronchail, J. Espinoza y J. Guyot. 2010. **Trends in rainfall and temperature in the peruvian**. Hydrological Processes.
- Le Goulven, P., M. Aleman y Orsono. 1988. **Homogeneización y regionalización pluviométrica por el método dei vector regional. corn. y o congrès équatorien d'hydraulique, quito, 23-26 xi 88**. págs. 59–83.
- Leiserowitz, A. 2012. **Global warming's six americas, march 2012 & nov. 2011**. En: **Project on Climate Change Communication**.
- Martínez, R., D. Ruiz, V. Marcos, M. Andrade, L. Blacutt, P. Daniel y otros. 2009. **Synthesis of the climate of the tropical andes**.
- MDMQ. 2011a. **Informe Anual 2011 Calidad del Aire**. DMQ, Quito.
- MDMQ. 2011b. **Memoria Técnica del Mapa de Cobertura Vegetal del Distrito Metropolitano de Quito (DMQ)**. Secretaría de Ambiente, Quito.
- Muñoz, A., C. Recalde, J. Cadena, A. Núñez, J. Díaz y R. Mejía. 2010. **Análisis Estadístico con F-Climindex para Ecuador. Informe Final**. INAMHI-MAE.

- Nieto, J., R. Martínez, J. Regalado y F. Hernández. 2002. **Análisis de tendencias de series de tiempo oceanográficas y meteorológicas para determinar evidencias de cambio climático en la costa del Ecuador.** Acta oceanográfica del Pacífico, 11(1): 17-21.
- OLE2. 2012. **Observatorio latinoamericano de eventos extraordinarios/centro de modelado científico cmc.** URL (<http://www.cmc.org.ve/mediawiki/index.php?title=Portada>).
- Oreskes, N. 2004. **The scientific consensus on climate change.** Science, 1686.
- Palacios, E. y S. Serrano. 2011. **Validación de los modelos de cambio climático hidrostáticos y no hidrostáticos sobre la climatología del Ecuador en las variables de precipitación y temperaturas extremas.** La Granja, 13(1)(1390-3799): 21-30.
- Peterson, T. 2001. **Report on the activities of the working group on climate change detection and related rapporteurs 1998-2001.** WMO, Rep. WCDMP-47, WMO-TD 1071, Geneve, Switzerland, pág. 143.
- Riebeck, H. 2005. **The rising cost of natural hazards, nasa earth observatory.** URL (<http://earthobservatory.nasa.gov/Features/RisingCost/printall.php>).
- Samaniego, J. 2009. **Cambio climático y desarrollo en América Latina y el Caribe: una reseña.** CEPAL, Santiago, documento de Proyecto.
- Santos, J. L. 2004. **Manual de Usuario de R-Climdex (Versión en Español).** Centro Internacional para la Investigación del Fenómeno del Niño CIIFEN.
- Serrano, S. y L. Basile. 2012. **La precipitación intensa vista desde la criticalidad autoorganizanda y las transiciones de fase continuas: un nuevo enfoque de estudio.** La Granja, 15(1)(1390-3799): 5-18.
- Serrano Chano, J. 2010. **18.63mm por cada diez años, y en la chorrera en donde el incremento llega a ser de 13.4 por cada diez años.** Proyecto Fin de Carrera, EPN.
- United Nations Framework Convention about Climate Change. (s.f.). **Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático.** 2012. URL (http://unfccc.int/portal_espanol/items/3093.php).
- Villacís, M. 2008. **Ressources en eau glaciaire dans les andes 613 d'équateur en relation avec les variations du climat : Le cas du volcan antisana.** Tesis Doctoral, Université Montpellier II.
- Villacís, M., A. Fernández, J. C. Pouget y M. Escobar. 2012. **Impactos del cambio climático en el sector agua durante los últimos 30 años e identificación de los aspectos que constituyen la vulnerabilidad.** Estudio de Vulnerabilidad del DMQ.
- Villacís, M., F. Vimeux y J. Taupin. 2008. **Analysis of the climate controls on the isotopic composition of precipitation (d18o) at nuevo rocafuerte, 74.5°w, 0.9°s, 250 m, Ecuador.** Comptes rendus GEOSCIENCES, 340: 1-9.
- Zambrano-Barragán, C., O. Zevallos, M. Villacís y D. Enriquez. 2010. **Quito's climate change strategy: A response o climatic change at te metropolitan district of Quito, Ecuador.** Resilient Cities: Cities and Adaptation to Climate Change.
- Zhang, X. y F. Yang. 2004. **R-climdex user's manual.** Climate Research Branch Enviroment Canada.