

Universidad Andina Simón Bolívar

Sede Ecuador

Área de Estudios Sociales y Globales

Maestría Profesional en Cambio Climático y Negociación Ambiental

Análisis estadístico de datos meteorológicos mensuales y diarios en el periodo 2006-2018 para la determinación de variabilidad climática y cambio climático en el Distrito Metropolitano de Quito

Josué Gabriel Venegas Zapata

Tutora: María Sheila Fabiola Serrano Vincenti

Quito, 2020



Cláusula De Cesión De Derecho De Publicación De Tesis

Yo, Josué Gabriel Venegas Zapata autor de la tesis intitulada "Análisis Estadístico De Datos Meteorológicos Mensuales Y Diarios En El Periodo 2006-2018 Para La Determinación De Variabilidad Climática Y Cambio Climático En El Distrito Metropolitano De Quito" mediante el presente documento dejo constancia de que la obra es de mi exclusiva autoría y producción, que la he elaborado para cumplir con uno de los requisitos previos para la obtención del título de Magister en Cambio Climático y Negociación Ambiental en la Universidad Andina Simón Bolívar, Sede Ecuador.

1. Cedo a la Universidad Andina Simón Bolívar, Sede Ecuador, los derechos exclusivos de reproducción, comunicación pública, distribución y divulgación, durante 36 meses a partir de mi graduación, pudiendo, por lo tanto, la Universidad utilizar y usar esta obra por cualquier medio conocido o por conocer, siempre y cuando no se lo haga para obtener beneficio económico. Esta autorización incluye la reproducción total o parcial en formato virtual, electrónico, digital u óptico, como usos en red local y en internet.

2. Declaro que en caso de presentarse cualquier reclamación de parte de terceros respecto de los derechos de autor/a de la obra antes referida, yo asumiré toda responsabilidad frente a terceros y a la Universidad.

3. En esta fecha entrego a la Secretaría General, el ejemplar respectivo y sus anexos en formato impreso y digital o electrónico.

Agosto de 2020

Firma:

A handwritten signature in black ink that reads "Josué Venegas". The signature is written in a cursive style with a large, sweeping initial 'J' and 'V'. Below the signature, there are some faint, illegible markings.

Resumen

El clima es un sistema complejo, y sus cambios incluyen el calentamiento global, la variabilidad climática, el efecto isla de calor urbana entre otros. Para su análisis es necesario el estudio estadístico de variables meteorológicas como la precipitación y la temperatura, representativas de una zona y sobre períodos de tiempo suficientemente largos.

El caso de estudio, se centrará en el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ), debido a que es una de las zonas del país con mayor cantidad de información meteorológica. La ciudad de Quito, está sintiendo los efectos cambio climático producto del incremento mundial en las emisiones de gases de efecto invernadero GEI, de la creciente población, su consecuente urbanización y demanda de recursos, que podrían estar ocasionando un cambio generalizado en el clima. ¿Existe este cambio de clima en esta área de estudio?, estudios similares realizados en años anteriores comparten sus resultados al respecto, así como también las posibles causas de estos efectos en Quito. De esta manera, el presente trabajo está enfocado en analizar el clima de los últimos 30 años considerando los índices de temperatura y precipitación de forma diaria y mensual registrados por las distintas entidades del estado en el DMQ.

El proceso para determinar la variabilidad climática se dividirá en dos partes, la primera, refiere la recopilación de datos de las estaciones meteorológicas, las cuales se presentan en el formato proporcionado por el INAMHI y la Secretaría del Ambiente, a cada matriz de dichos datos se le realizará un control de calidad y un tratamiento de regularización de formato de compatibilidad para posteriormente trabajarlos en Climdex ejecutado sobre la plataforma de R-Studio, metodología recomendada por el Panel Intergubernamental de Expertos frente al Cambio Climático IPCC, que consiste en el cálculo de índices específicos para determinar la existencia o no de Cambio Climático y su magnitud (IPCC, 2013). Estos índices climáticos son derivados de datos diarios de temperatura y precipitación, y son un conjunto estandarizado recomendado por el equipo de expertos de CCI / WCRP / JCOMM sobre detección e índices de cambio climático (ETCCDI). Una vez logrados los índices se discutirán los resultados respecto a la ubicación geográfica de las estaciones meteorológicas estudiadas (Climdex, 2020).

Dedicatoria

Dedicado a Zoilita, por ser más que una abuela, una madre, es y será sobre todo mi amiga, quien me ha apoyado desde mi nacimiento y ha estado siempre guiándome en todo momento, gracias a ella soy un profesional y un hombre de bien.

Agradecimientos

A mis madres Doris, Ivet y Valerita quienes son un pilar fundamental en mi vida, a mis padres, hermanos y amigos quienes me han apoyado a lo largo de esta nueva etapa.

A mi directora Sheila Serrano Vincenti cuya ayuda ha sido fundamental para realizar este trabajo, además por todo su apoyo incondicional y por ser más que mi mentora, mi guía y mi amiga en este camino.

A los estudiantes de noveno semestre de 2019 de la Carrera de Ingeniería Ambiental de la Universidad Politécnica Salesiana por la recolección de los datos, y a Leandro Robaina, un excelente profesional, gracias por todo, sin su ayuda no se habría podido llegar a esta meta.

Tabla de Contenido

Introducción	19
Capítulo Primero	25
1. Marco Teórico	25
1.1 Calentamiento Global o Cambio Climático antropogénico	25
1.2 Cambio Climático en el Mundo	25
1.3 Cambio Climático en Latinoamérica.....	28
1.4 Cambio Climático en la Región Andina	30
1.5 Cambio Climático en el Ecuador y Quito	34
1.6 Efecto Isla de Calor Urbana	37
1.6.1 Crecimiento Urbano	38
1.6.2 Ausencia de Áreas Verdes.....	39
1.7 Descripción de la zona de estudio	40
1.8 Índices de Cambio Climático	40
1.8.1 Tn90p	41
1.8.2 TNx	41
1.8.3 Tx90p	41
1.8.4 TXx	41
1.8.5 DTR.....	42
1.8.6 CDD	42
1.8.7 R95pTot.....	42

1.8.8 R99pTot.....	42
1.8.9 R20	43
1.9 Relación entre los Índices y el Cambio Climático	44
Capítulo Segundo.....	45
1. Área de Estudio y Metodología.....	45
1.1 Área de Estudio	45
1.2 Metodología	48
1.3 Descripción de las herramientas.....	49
1.3.1 RStudio.....	49
1.3.2 Climdex.....	50
1.4 Proceso de Análisis	51
1.4.1 Recopilación de Datos.....	52
1.4.2 Uniformización de datos a formato estándar.....	55
1.4.3 Control de calidad de los datos.	56
1.4.4 Computo en Climdex sobre la plataforma RStudio.	56
1.4.5 Exportación de valores.....	57
1.5 Realización de gráficos.	58
Capítulo Tercero.....	61
1. Presentación y Análisis de Resultados	61
1.1 Índice TXx	62
1.2 Índice Tx90p	64
1.3 Índice TNx	65

1.4 Índice Tn90p	66
1.5 R20mm	68
1.6 Índice CDD	69
1.7 Índice R95p	70
1.8 Índice R99p	72
1.9 DTR.....	73
Conclusiones y Recomendaciones	75
1. Conclusiones	75
2. Análisis Comparativo.....	77
3. Recomendaciones: Cambio Climático e Isla de Calor Urbana	79
Bibliografía	83
Apéndice	89
Índices Climáticos No Considerados	89

Índice de Tablas

Tabla 1: Relación entre los índices y el cambio climático.....	44
Tabla 2: Estaciones de la zona de estudio con datos diarios y con series de tiempo mayores a 20 años.....	47
Tabla 3: Resumen del diagnóstico de datos de las estaciones propuestas.....	53
Tabla 4: Formato de datos obtenidos de las estaciones Iñaquito, Izobamba Y La Tola.....	55
Tabla 5: Formato estandarizado para los datos de las estaciones del INAMHI.....	55
Tabla 6: Formato de compatibilidad de datos de los Índices Climáticos.....	57
Tabla 7: Formato de presentación de estadísticas para cada Índice.....	58
Tabla 8: Cuadro de estadística e índices climáticos por estación del DMQ.....	62
Tabla 9: Tabla comparativa para los índices de la estación Izobamba.....	78

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1: Mapa de Densidad de Estaciones Meteorológicas y en Funcionamiento en el DMQ.....	22
Ilustración 2: Mapa de ubicación de la zona de estudio.....	46
Ilustración 3: Mapa de ubicación geográfica de las estaciones en la zona de estudio. ...	47
Ilustración 4: Proceso metodológico para el análisis de datos.	51
Ilustración 5: Ejemplo de gráfica obtenida del procesamiento de datos meteorológicos en el software Climdex	58
Ilustración 6: Temperaturas máximas extremas.....	63
Ilustración 7: Temperatura máxima registrada.....	64
Ilustración 8: Máximo de temperaturas mínimas registradas.....	65
Ilustración 9: Temperaturas mínimas diarias que sobrepasan el percentil 90.....	67
Ilustración 10: Cantidad diaria de precipitación mayor a 20 mm.	68
Ilustración 11: Días secos consecutivos.....	70
Ilustración 12: Días muy lluviosos.....	71
Ilustración 13: Días extremadamente lluviosos.	72
Ilustración 14: Rangos diurnos de temperatura.....	73

Introducción

El calentamiento global se caracteriza por un aumento, en el tiempo, de la temperatura media de la atmósfera terrestre y de los océanos, se postula además que la temperatura se ha elevado desde finales del siglo XIX debido a la actividad humana y su principal causa recae en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) conformados por dióxido de carbono, ozono, gas metano, óxido nitroso, clorofluorcarbonados (CFC, HFC, PFC), las mismas que conforman y que han incrementado el efecto invernadero, generando así el mencionado aumento de temperatura en la atmósfera del planeta. Se predice de acuerdo a modelos matemáticos, que las temperaturas continuarán subiendo en el futuro si continúan las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), por lo que se conoce que para evitar un efecto irreversible para el planeta se deben tomar acciones preventivas lo más pronto posible (Soza, 2019).

En la actualidad, de acuerdo al Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), quien es la fuente científica oficial en temas de cambio climático, presenta a este como “la variación del estado del clima identificable (por ejemplo, mediante pruebas estadísticas sobre datos recopilados en todo el mundo)” (IPCC, 2013), influenciado por las actividades antropogénicas como la utilización de combustibles fósiles, explotación de bosques y muchas más acciones consecuencia de los modelos de crecimiento económico que persigue cada región del planeta.

Por otra parte, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), define al Cambio climático en su primer artículo, como el “cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables” (CMNUCC, 2018), así pues coinciden las distintas definiciones que brindan una pauta para comprender de mejor manera a este fenómeno que afecta a todo el planeta y que es impulsado principalmente por el mismo ser humano. El texto de la CMNUCC menciona también en sus artículos una particularidad que marca una diferencia entre el cambio climático y la variabilidad climática, pues, el cambio climático es atribuible a las actividades antropogénicas, las

mismas que influyen y además altera la composición de la atmósfera del planeta, mientras que a la variabilidad climática se le atribuyen las causas naturales.

De acuerdo al IPCC, la variabilidad climática “denota las variaciones del estado medio y otras características estadísticas (desviación típica, sucesos extremos, etc.) del clima en todas las escalas espaciales y temporales más amplias que las de los fenómenos meteorológicos” (IPCC, 2013). En otros términos, a la variabilidad climática se le pueden atribuir los procesos naturales de carácter interno que conforman el sistema climático, a dichos procesos se los puede nombrar como variabilidad interna, mientras que, por otro lado, a las variaciones del forzamiento natural o causado por fuerzas antropogénicas adquieren el nombre de variabilidad externa, por lo tanto, esta variabilidad climática externa es lo que ahora llamaremos cambio climático.

Este cambio climático tiene un efecto sobre todo el planeta, trayendo consecuencias que ponen en peligro a todos los seres que lo habitan, estos efectos también se extienden hasta la zona ecuatorial, lo que conduce a estudiar sus causas e impactos en el Ecuador. Desde la Primera Comunicación Nacional del Ecuador de Cambio Climático (2010) se ha indicado que el país se encuentra altamente vulnerable a los impactos del cambio climático, esto no sólo se debe a la posición geográfica que ocupa, sino también a la variada topografía que dificulta su estudio y análisis. Además, se suma la ocurrencia de fenómenos naturales periódicos como son los del Niño y la Niña. Estos causan normalmente que se registre un aumento de precipitación en ciertas regiones, y sequías en otras partes del planeta. En Ecuador se registran inundaciones de forma recurrente durante el tiempo en que presenta el Fenómeno del Niño Oscilación Sur (ENSO) y sequías en La Niña como menciona el artículo Regímenes ENSO: reinterpretando el canónico y Modoki El Niño (Takahashi, Montecinos, Goubanova, & Dewitte, 2011).

En el Distrito Metropolitano de Quito, la exposición a la variabilidad climática y el cambio climático es atribuida a múltiples factores entre los que contamos en primer lugar a las condiciones geográficas de la ciudad, ya que contiene valles, elevaciones y planicies, estos relieves afectan la circulación del viento como mencionan estudios sobre microclimas (Guarderas, Coello, & Silva, 2016). Asimismo, la presencia de equinoccios y solsticios determinan las características estacionales de precipitación y temperaturas en

la capital (Serrano et al. 2012). Sin embargo, la ocurrencia de eventos extremos tanto de precipitación como de temperaturas ha sido directamente vinculado con el cambio climático -o variabilidad climática externa o antrópica-. En efecto, “la Secretaría del Ambiente del DMQ reconoce que debido a la variabilidad climática y al cambio climático en los últimos años, el DMQ se ha visto afectado por la elevación de la temperatura y la presencia de eventos extremos. Por otra parte, estudios realizados a nivel del DMQ como el de Zambrano – Barragán dedicados al análisis de la temperatura estiman que entre 1981 y 1999, la temperatura media aumentó entre 1.2°C y 1.4°C, de forma similar, estudios como el de Serrano (2012) analiza a los eventos climáticos extremos tanto de precipitación como de temperaturas mínimas y máximas muestran un incremento gradual en la temperatura y un incremento tanto en frecuencia como intensidad de los eventos de precipitación.

Por otro lado, El Distrito Metropolitano de Quito, considerado como la capital del Ecuador y declarado patrimonio cultural de la humanidad por la UNESCO el 18 de septiembre de 1978 (UNESCO, 2018) presenta un constante crecimiento anual en cuanto a su población y por consiguiente de su sector urbano (Instituto Nacional de Estadística y Censos INEC, 2019), esto ha llevado a que cada vez más se reemplace la vegetación por zonas urbanas, construyendo una gran jungla de asfalto en algunas zonas, reteniendo el calor del día y contribuyendo con el efecto Isla de Calor Urbana (ICU) (Villanueva-Solis, Ranfla, & Quintanilla-Montoya, 2012). Este efecto promueve el incremento de temperatura, y se suma a los efectos del cambio climático en la ciudad. De acuerdo a la Organización Mundial de la Salud (OMS), el Distrito Metropolitano de Quito actualmente cumple con el espacio verde por habitante recomendado, sin embargo, este se encuentra mal distribuido, por lo que el Municipio de Quito se ha visto en la necesidad de proponer el diseño e implementación de la Red Verde Urbana para la ciudad y así generar una equidad de espacio verde que conecte los barrios, zonas y sectores que conforman el Distrito.¹

¹ En la presente investigación, las variables de temperatura muestran los impactos del cambio climático e Isla de Calor Urbana (ICU) de manera unificada.

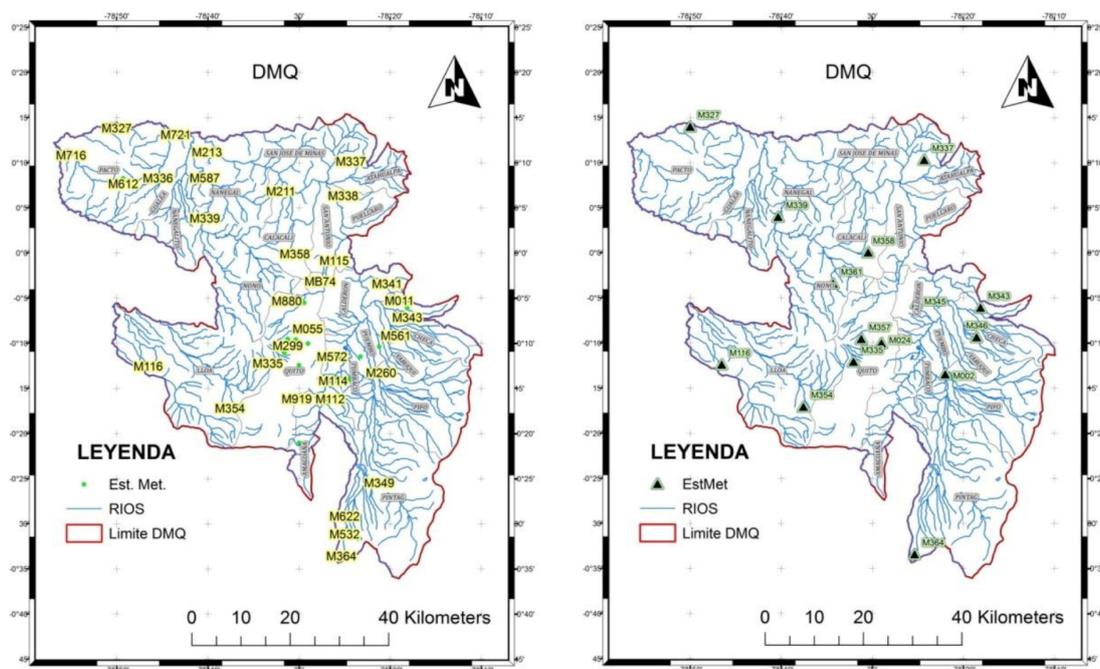
La respuesta ante esta preocupación se puede observar en el documento Ciudades del Buen Vivir, Quito hacia un Modelo Sustentable: Red Verde Urbana y Ecobarrios elaborado en colaboración con la Secretaría de Territorio, Hábitat y Vivienda (MDMQ, 2014).

Desde hace ya unos años, organismos como el Ilustre Municipio Metropolitano de Quito, así como también entidades dedicadas al control de datos e información estadística con respecto al clima como el INAMHI y la Secretaría del Ambiente del Municipio de Quito, han almacenado los datos de este proceso de cambios en la temperatura de la ciudad. Los datos meteorológicos son recopilados y almacenados dentro de estaciones meteorológicas llamadas EMAS, existen 51 estaciones meteorológicas, sin embargo, únicamente 14 de estas reportan datos hacia el INAMHI, estos últimos corresponden a los registros de la temperatura, presión y precipitación del ambiente y se almacenan en una unidad digital que posteriormente es enviada al Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología, así como También a la Secretaría de Ambiente.

Estas mediciones se realizan en intervalos de tiempo que están programados por el operador, aunque para el mencionado estudio se requiere de datos diarios debido al enfoque que se quiere dar sobre la ocurrencia de eventos extremos de lluvia y precipitación. Por lo tanto, el número de estaciones disponibles con datos diarios y con series de tiempo suficientemente largas se limita (INAMHI, 2015).

Ilustración 1:

Mapa de Densidad de Estaciones Meteorológicas en Funcionamiento en el DMQ.



Fuente: INAMHI 2015

Elaboración: Wellington Bastidas (Bastidas Guevara, 2016)

Con la finalidad de responder la pregunta de esta investigación ¿Cómo se compara los cambios de clima recientes en Quito respecto a los indicadores climáticos reportados por estudios anteriores? El método consiste en proceder a un tratamiento estadístico de la información disponible en las instituciones que llevan el registro meteorológico en el área de estudio. Utilizando el programa estadístico Climdex, se podrá determinar el comportamiento de variables específicas como son las temperaturas máximas, mínimas y la precipitación a nivel diario. A través del estudio de indicadores específicos recomendados por el IPCC y que determinan la frecuencia, intensidad y persistencia de eventos meteorológicos extremos tanto de precipitación como de temperaturas.²

² De esta manera, refiriéndonos a las recomendaciones del IPCC, se tomará como referencia el trabajo realizado por los autores Sheila Serrano, Enrique Palacios, Diana Zuleta y Marcos Villacís, que menciona en el artículo de investigación “Análisis Estadístico de Datos Meteorológicos Diarios y Mensuales del Distrito Metropolitano de Quito para Estudios de Variabilidad Climática y Cambio Climático” estudio que utilizó el período de tiempo de (1963-2011), que existe evidencia de cambio climático en la ciudad. Este efecto se conjuga con efecto ICU, es un factor que no debe ser ignorado debido al creciente desarrollo urbano exponencial que presenta el Distrito Metropolitano.

Se toman en consideración publicaciones en el área de estudio, como la de Serrano (2012) y de Zambrano-Barragán (2011), que afirman que existe evidencia de Cambio Climático de origen antrópico en Quito. Al analizar estudios a nivel nacional, nos referimos al trabajo de Alfredo Núñez en su publicación Análisis Estadístico con FClimdex para Ecuador, tanto él como sus coautores llegan a la siguiente conclusión acerca de los posibles efectos del cambio climático en el futuro: “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 (Alfredo Núñez, 2010). El análisis del presente trabajo cubre el periodo de tiempo 2006-2018, y de esta manera se constituye como un complemento para futuros trabajos que requieran información sobre el registro histórico del comportamiento climático en el Distrito Metropolitano de Quito.

Estos estudios se centran en el análisis de eventos extremos tanto de precipitación como de temperaturas máximas y mínimas. Debido a que los eventos extremos ocurren ocasionalmente, es necesario trabajar con datos de resolución diaria. Asimismo, el período mínimo de análisis debe oscilar entre los 20 y 30 años, lo que restringe el número de estaciones meteorológicas aptas para provisión de datos climáticos. El programa más utilizado para este análisis es Climdex, que puede ser trabajado sobre lenguaje C, F, y R.

Capítulo Primero

1. Marco Teórico

En este capítulo se trata de comprender como algunas características intrínsecas del clima se han manifestado frente al sistema climático de la tierra, tal es así que se hará un repaso sobre el calentamiento global, la variabilidad climática, el efecto ICU y como es que cada uno de estos ha afectado en general al planeta, a Latinoamérica, a la región andina, al país de Ecuador y más concretamente al Distrito Metropolitano de Quito.

1.1 Calentamiento Global o Cambio Climático antropogénico

El planeta actualmente está atravesando por condiciones que influyen a la alteración de sus temperaturas promedio, es por esta razón que decimos que el calentamiento global, definido por La Corporación Universitaria de Investigación Atmosférica como “El incremento de la temperatura del planeta como consecuencia tanto de factores naturales como de la acción de los seres humanos, en particular, de la emisión de gases de efecto invernadero que puede tener repercusiones en todo el sistema climático” (Corporación Universitaria de Investigación Atmosférica , 2020) nos muestra como el planeta tierra ha registrado incrementos o disminuciones de su temperatura a lo largo de la historia, mucho más desde la primera revolución industrial cuyos efectos se sienten hasta el día de hoy como menciona Alfredo Bula (Bula, 2009) donde un claro ejemplo es el deshielo de los glaciares, es por tanto que el calentamiento global un peligro potencial para el desarrollo de la vida en la tierra, muchos científicos se han reunido para determinar sus causas y posibles soluciones.

1.2 Cambio Climático en el Mundo

El clima en el mundo cambia constantemente durante el paso del tiempo, se sabe que este proceso ha ocurrido de forma natural a lo largo de la historia y es así que esta afirmación se puede evidenciar analizando las distintas eras de nuestro planeta, sin embargo, desde la revolución industrial el clima en el planeta ha tenido variaciones nunca

vistas anteriormente las cuales fueron causadas por las actividades antropogénicas de la época, para disminuir el aumento de la temperatura del planeta, 169 países firmaron el protocolo de Kyoto, un compromiso con el que se pretendía disminuir hasta en un 5.2% las emisiones de gases de efecto invernadero tomando como punto de partida a los niveles existentes de emisiones en 1990 (Bula, 2009).

Por lo tanto, con base en proyecciones científicas presentadas en informes de años anteriores por parte del IPCC se prevé un aumento en la temperatura media global en superficie para el final del siglo XXI (período 2081-2100) de 2,6°C a 4,8°C bajo RCP 8,5 en un supuesto escenario A2 en el cual el planeta mantiene su actual comportamiento, lo cual continúa en proyección como se menciona en el Informe de Síntesis de Cambio Climático de 2014 del IPCC en el cual se estima un incremento adicional de la temperatura de entre 0,9°C y 2,0°C para el periodo 2046-2065, además se menciona también en el mismo informe que “Desde aproximadamente 1950 se han observado cambios en muchos fenómenos meteorológicos y climáticos extremos” (IPCC, 2014). Algunos de estos cambios como por ejemplo la disminución de las temperaturas frías extremas, el aumento de las temperaturas cálidas extremas, la elevación de los niveles máximos del mar y el mayor número de precipitaciones intensas en diversas regiones, pueden ser asociados con influencias humanas.

Ante esto, el IPCC en su Informe de Síntesis de 2014 comparte que “las proyecciones apuntan a que es probable que, para el final del siglo XXI (2081-2100), la temperatura global en superficie sea superior en 1,5 °C para los escenarios RCP4,5, RCP6,0 y RCP8,5 (nivel de confianza alto)” lo cual confirma lo indicado por Manuel Rodríguez Becerra y Henry Mance quienes mencionan en su libro Cambio climático: lo que está en juego que “una persona que nazca en 2010 viviría en un mundo con tal aumento de temperatura antes de cumplir los cuarenta y cinco años de edad”, es decir, dicha persona sentirá las consecuencias de la variabilidad climática, misma que dependerá de la cantidad de emisiones de GEI (Gases de Efecto Invernadero) producidas hasta ese momento, por consiguiente, tal cantidad de emisiones dependerá a su vez de la magnitud de importancia que tenga el grado de desarrollo económico y social hasta el momento y de las medidas tomadas y aplicadas para reducir las emisiones consecuencia de tal desarrollo (Becerra & Mance, 2009).

De igual manera, el término Calentamiento Global se atribuye a la variación de temperatura, esta puede afectar tanto en la humedad, en la velocidad de los vientos o en el incremento o disminución de las precipitaciones. Dicha variación ha causado que se manifiesten fenómenos meteorológicos extremos que, con el aumento de la temperatura global, crezcan constantemente tanto en frecuencia como en intensidad; a estos mencionados eventos se los asocia con el término variabilidad climática. De igual manera, la variación del clima hace que muchas zonas del planeta sean propensas a soportar bajas temperaturas, un mayor número de incendios, aumento de vectores y/o plagas, sin mencionar que existen puntos del planeta conocidos como “Sistemas Vulnerables”, es decir, son lugares sensibles o expuestos a sufrir mayores consecuencias producto de los efectos del cambio climático.

Considerando las conclusiones de los estudios previos anteriormente mencionados como el de Serrano (2012), es necesario establecer medidas tanto de adaptación como de mitigación para así hacer frente a los efectos adversos que provoca la variabilidad climática, y para lograrlo es necesario considerar y comprender las definiciones exactas de lo que entendemos por cambio climático. Por ejemplo, el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) manifiesta que “se refiere a cambio climático como cualquier cambio en el clima a lo largo del tiempo, ya sea debido a la variabilidad natural o como resultado de una actividad humana” (IPCC, 2002).

Dichos efectos son considerados como un problema que afecta incluso a la geografía del planeta, es decir, su forma, su estructura e incluso la distribución de los fenómenos naturales, puesto que mientras exista un incremento de los efectos adversos que provoca la variabilidad climática, mayor será el desgaste del ambiente. Gerarda Díaz Cordero del Instituto Tecnológico de Santo Domingo en República Dominicana comenta que “La degradación del medioambiente se manifiesta con un aumento en el uso y escasez del petróleo, escasez de agua, contaminación de los océanos, la extinción de animales y plantas” (Díaz Cordero, 2012). Este comentario nos da a entender que mientras aumente el consumo indiscriminado de recursos naturales y la contaminación en el planeta, mayor será el aumento de la variabilidad climática debido a que se ve comprometido el equilibrio

natural de las zonas donde se esté extrayendo los recursos creando un círculo de daño directamente proporcional a la interacción de estos factores y el ambiente.

1.3 Cambio Climático en Latinoamérica

Al ser América Latina una zona de países con creciente aumento de población, se evidencia que la concentración de gases de efecto invernadero es proporcional al aumento de la demanda de recursos, como de los desechos que producen el consumo de los mismos. Cabe señalar que las tecnologías usadas para solventar la creciente demanda de recursos no son tan actualizadas y eficientes como las que utilizan los países desarrollados y por lo tanto contribuyen a la contaminación ambiental y posteriormente a la variabilidad climática; no obstante, es necesario aclarar que América Latina prácticamente no aporta con una cantidad significativa en la emisión global de GEI. La Comisión Económica para América Latina y el Caribe menciona como dato que “Brasil, México, Venezuela y Argentina, contribuyen con el 80% del total de emisiones de la región y al 9% del total mundial” (CEPAL, 2017) sin embargo y ante todo lo mencionado si es vulnerable a los efectos del cambio climático a pesar de no ser un gran contribuyente del mismo.

De acuerdo con el documento, “Impactos del Cambio Climático en Latinoamérica”, presentado en la Conferencia de la Alianza Cooperativa Internacional (ACI) celebrada el 23 de noviembre de 2010, se menciona que para el año 2030 la tendencia a mediano plazo del incremento de temperatura sobre el clima apunta hacia una mayor cantidad de días cálidos y secos extremos para el continente americano en general y especialmente a América Latina, debido a que se observa un aumento en las concentraciones antropogénicas de gases de efecto invernadero, lo cual podría traducirse en calor y sobre todo en aumento de la duración de los períodos de sequía en una o varias regiones y por contraparte un aumento de fuertes precipitaciones en otras.

Otro de los desafíos a los que se exponen los países en vías de desarrollo pertenecientes a América Latina es justamente la mejora continua de su capacidad de producción, porque esta demanda mayor consumo de recursos para el desarrollo de actividades más eficientes que logren solventar las necesidades de la población, como por ejemplo, más espacio para viviendas, mayores rutas de transporte, la gran demanda de

agricultura, así como también de silvicultura en el aspecto alimentario, trayendo como consecuencia la generación de GEI, los mismos que destruyen sumideros de carbono y contribuyen al incremento de la variabilidad climática; la generación de estos efectos se ven magnificados a través de la deforestación, el consumo exagerado de los recursos naturales y el cambio del uso del suelo obligado por el “desarrollo” de las ciudades y países.

En América Latina son diversas las poblaciones que son participes y al mismo tiempo sufren las consecuencias del cambio climático, un ejemplo de esto es el evidente incremento en la intensidad de las lluvias o el aumento del nivel del mar, cuyos efectos se manifiestan de manera directa hacia los asentamientos humanos ubicados en las costas de los océanos Pacífico y Atlántico.

Habría que mencionar también que las alteraciones a las que se ven expuestos los ciclos de vida de muchas especies de flora y fauna marinas producto de la pesca indiscriminada y el daño sufrido por los arrecifes de coral debido al aumento en la temperatura del mar como una consecuencia del cambio climático, tienen impactos que no solo se expanden a lo largo de los océanos sino que afectan de manera directa al patrimonio natural así como también, aunque de manera indirecta, a las comunidades que dependen de las actividades relacionadas con la pesca y la acuicultura consideradas necesarias para su sustento como se menciona en el texto “El Cambio Climático y sus Consecuencias para América Latina” (Herrán, 2012)

El impacto del cambio climático en América Latina será cada vez más evidente y mejor comprendido por las personas mientras sea analizando desde diferentes ejes, en cuanto a adaptación por ejemplo, es posible que se dé la extinción de las especies de la sabana central brasilera como una consecuencia al efecto irreversible de la variación climática provocando la sabanización de este territorio, acto seguido se pronostica también la pérdida de las especies forestales y de incontable biodiversidad de la Amazonía de esta región, así como un declive de la productividad de los ecosistemas, incluyendo en este último a los sumideros de carbono naturales como lo son los bosques tropicales, dejando únicamente presentes a las especies que logren familiarizarse con las condiciones climáticas presentes.

Con respecto a la mitigación, la cual ha sido una medida adoptada para combatir los efectos del cambio climático en América Latina, los países han considerado unirse a iniciativas como la del Acuerdo de París y la Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre el Cambio Climático debido a que, como dice Alicia Bárcena, será necesario solicitar la cooperación mundial con el fin de contar con un apoyo económico, mediante el cual se logre consolidar un mecanismo financiero y de esta manera no solo dotar de recursos e ideas sino también fortalecer al desarrollo y la transferencia de tecnología que sirva de apoyo tanto para las medidas de mitigación como también para los planes de adaptación que se ajusten de la mejor manera posible a la región (Alicia Bárcena, 2018)

Por otro lado, para América Latina se prevé también que los glaciares tropicales de latitudes medias experimenten una considerable disminución en los próximos años ocasionando una baja general de la disponibilidad de fuentes hídricas para las ciudades que de manera directa dependen de esta red de suministro del recurso, un claro ejemplo de esto es la crisis del agua en ciudades como La Paz, capital que han tenido que luchar para que estos efectos negativos consecuencia del cambio climático no sigan aumentando y comprometiendo no solo a sus habitantes sino también a su fauna y flora (Magrin et al., 2007).

Otras de las consecuencias que ha traído el cambio climático cuyos acontecimientos se sienten actualmente en muchas capitales latinoamericanas tienen que ver con la menor duración de la temporada de lluvias, como resultado de estas se tienen eventos extremos muy intensos alternados ya sea con excesiva o con falta de precipitación y se manifiestan en acciones como el aumento del frío por las noches y de calor sofocante durante el día, eventos que se presentan mayormente en las tierras altas (en los páramos en forma de heladas), poniendo en riesgo la no solo la salud de los habitantes de las ciudades sino también la integridad alimentaria de estas y el desarrollo de los pequeños productores (PNUD, 2009).

1.4 Cambio Climático en la Región Andina

La región andina es una de las zonas geográficas que se ven sensibles ante el cambio climático, y comprende los territorios de Venezuela, Colombia, Ecuador, Perú,

Chile y una parte de Argentina. Cuenta con nevados y elevaciones montañosas, sin embargo, en Colombia, Ecuador, Perú y Chile destacan los páramos, estos son reconocidos como ecosistemas estratégicos que desempeñan un papel fundamental ya que no solo actúan como esponjas naturales que retienen el agua y alimentan la red hídrica de las ciudades sino que también tienen la capacidad de retener el CO₂ hasta 10 veces más que un bosque tropical, lo que los convierte en excelentes sumideros de carbono (Hofstede, 2014).

El CO₂ que absorben los sumideros de la región andina, son el resultado del desarrollo y los avances en el sector de la producción desde la época de la revolución industrial, llegando a una concentración de 403 partes por millón registradas hasta el año 2016 de acuerdo a la Organización Meteorológica Mundial (OMM) (OMM, 2011). Los países desarrollados han acumulado ya al menos un centenar de años de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), los mismos que continúan en la atmósfera del planeta y que con ayuda de los vientos se mueven hacia distintas zonas del mundo, las descargas de desechos de todo tipo y una demanda exagerada de consumo de recursos que va de la mano con modelos para una economía cada vez más creciente han representado un alto costo para con el ambiente debido a su gran concentración de GEI, a esto se debe sumar que la capacidad de retener todo ese conjunto de gases está llegando a su límite.

Como se menciona en “Deglaciation in the Andean region”, aproximadamente el 99% de los glaciares tropicales se concentra en los Andes, es así que la región Andina cuenta con un recurso importante de nevados y páramos que no solo tienen el papel de ser una gran fuente de agua a las ciudades de esta región, sino que también, como ya se ha mencionado, funcionan como sumideros de carbono captando todo el CO₂ posible, un ejemplo de cómo el cambio climático trae consecuencias es el caso del Quelccaya, un nevado tropical considerado como el mayor del mundo y está ubicado en Perú, actualmente su capa de hielo se encuentra perdiendo alrededor de 60 metros por año, una cifra que preocupa ya que hace cuatro décadas tan solo perdía seis metros por año aproximadamente. El Pastouri, glaciar situado al sur de la Cordillera Blanca, es otro ejemplo de cómo entre 1995 y 2005 la capa de hielo se ha reducido casi en la mitad. (Painter, 2007).

Un ejemplo de esta reducción se menciona en el artículo Glaciares de los Andes Tropicales víctimas del cambio climático donde manifiesta que la reducción de estos glaciares se da a partir de entre 1976 y 1980 registrando una disminución importante, mediante esta tendencia se confirma que “se puede prever la desaparición de muchos “pequeños glaciares” cuyos picos están muy cerca de su línea de equilibrio, como el Chacaltaya en Bolivia (desaparecido en 2010), el Broggi en la Cordillera Blanca (Perú), reducido a un montón de hielo residual, o el Carihuayraza y el Illiniza Sur (Ecuador) que deberían desaparecer en los próximos años (Francou, 2013)

Estos ejemplos documentados indican que el agua proveniente de los nevados y páramos de la región andina son un recurso indispensable para la agricultura, el abastecimiento de agua a las ciudades y el desarrollo tanto de la vida como de la economía, muchos países de la región andina apuestan casi todos sus recursos económicos hacia proyectos hidroeléctricos que dotan de energía a sus ciudades y al mostrarse comprometidos por los efectos del cambio climático, ocasionarían grandes problemas que involucran no solo a fauna y flora aledañas sino también a la calidad de vida de los habitantes de estas regiones.

Existen así mismo muchos otros ejemplos que evidencian la problemática del cambio climático y lo que conlleva esto, así tenemos al Chacaltaya boliviano cuyos registros históricos indican que tiene más de 18000 años, pero que ya ha perdido cerca del 80% de su área en los últimos 20 años. Al día de hoy constituye un símbolo de lo que está ocurriendo a los pequeños glaciares andinos y al igual que este, la cordillera Tuni Condoriri es la encargada de abastecer La Paz y la ciudad vecina de El Alto, en donde viven casi dos millones de personas, la reserva bajo esta cordillera que provee casi 80% del agua potable para El Alto y gran parte de La Paz también se ha visto comprometida por los efectos del calentamiento global (Feo, 2009).

El estado Mérida en Venezuela es otra muestra de cuan impresionante es la vulnerabilidad de región andina, este estado se caracteriza porque posee las cumbres más altas del país, las cuales han sido nombradas como las Cinco Águilas Blancas por los habitantes del lugar, de estas sobresale el pico Bolívar, cuya altura se registra en aproximadamente 4980 metros sobre el nivel del mar siendo el más elevado, de las Cinco

Águilas Blancas sólo las dos primeras conservan en muy poca cantidad algo de su cumbre nevada ya que según los lugareños en los últimos 30 años el derretimiento de los penachos ha sido desolador.

Bajando un poco por la región andina se encuentra el Volcán Nevado de Ruiz, representante de los nevados de Colombia, según evidencias este ha perdido 45% de su área glaciaria y se cree que su capa de hielo podría desaparecer más o menos en seis años, el Parque de los Nevados como se lo conoce en Colombia, alberga al Tolima, Santa Isabel (nevado que se prevé no le quedan más de 20 años de hielo) y Quindío.

Casi al final de la cordillera de los andes está el Parque Nacional Torres del Paine, una impresionante atracción natural ubicada al sur de Chile, en esta se puede disfrutar de montañas, lagos y por supuesto glaciares de los cuales destaca el glaciar Grey, este desafortunadamente ha experimentado un importante retroceso de sus hielos, se estima que su capa gélida ha disminuido una distancia de dos kilómetros en diez años.

Finalmente, en Ecuador reconocemos como el Cayambe, Chimborazo, Cotopaxi, Altar, Antisana, Sangay, Ilinizas, entre otros son las fuentes que dan origen a los ríos Napo, Pastaza, Aguarico, Santiago, Morona y Machinaza respectivamente; de todas estas montañas ecuatorianas se permite la alimentación del río Amazonas y, además, las aguas de estas montañas permiten sostener la vida en esa región. Sin embargo, vemos que glaciares como el Imbabura, Cotacachi y Pichincha han perdido casi completamente sus capas nevadas y los efectos de estas pérdidas se manifiestan a través de cambios de temperatura y falta de agua en las ciudades correspondientes a las provincias de Imbabura y Pichincha. Un dato adicional y que preocupa mucho corresponde al volcán Cotopaxi, el nevado considerado como uno de los mayores picos del planeta tiene una altura de 5897 msnm, y se estima que ya ha perdido alrededor del 31% de su capa glaciaria en los últimos 30 años (Feo, 2009).

Estos son solo algunos ejemplos de cómo la región andina se ha visto vulnerada debido a los efectos del cambio climático, se conoce que muchos nevados y páramos son sumideros de carbono que se ven afectados por la emisión de gases de efecto invernadero, por lo que si la tendencia al calentamiento continúa, el deshielo de estos imponentes colosos podría provocar la emisión natural de miles de millones de toneladas de carbono

a la atmósfera, las mismas que se encuentran almacenadas en las capas de nieve así como también en los pantanos helados, acelerando a su vez el calentamiento global.

1.5 Cambio Climático en el Ecuador y Quito

La evidencia de que el cambio climático es una realidad y que sus efectos se sentirán alrededor en todo el mundo es contundente gracias a las evidentes transformaciones que ha sufrido el planeta a lo largo de los años, el aumento del nivel del mar, el deshielo de los casquetes polares y glaciares, los cambios de temperatura traducidos como eventos extremos y las fuertes olas de frío y calor a lo largo de los días son muestras claras de su existencia.

En el Ecuador, en el año 1993 se forma el Comité Nacional Sobre el Clima enfocándose en cuatro objetivos a largo plazo que sentarían las bases para aportar soluciones, así, se designa como presidente del Comité al aquel entonces Ministerio del Ambiente; consecuentemente al ser conscientes del problema y estar llamados a generar soluciones se presentó la “Primera Comunicación Nacional” ante la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático, impresa y entregada en el año 2001. En este Primer informe de Comunicación Nacional se presentan los resultados de estudios y evaluaciones realizados en el país durante los últimos años, continuando con la Segunda Comunicación Nacional en 2011 y la Tercera Comunicación Nacional presentada en mayo del 2017.

En la Segunda Comunicación Nacional sobre Cambio Climático, entre los impactos más probables que se podrían verificar en el Ecuador se destacan: “(1) la intensificación de eventos climáticos extremos, como los ocurridos a causa del fenómeno “Oscilación Sur El Niño”; (2) el incremento del nivel del mar; (3) el retroceso de los glaciares; (4) la disminución de la escorrentía anual; (5) el incremento de la transmisión de dengue y otras enfermedades tropicales; (6) la expansión de las poblaciones de especies invasoras en Galápagos y otros ecosistemas sensibles del Ecuador continental; y (7) la extinción de especies”, este último es de los puntos más importantes debido a que Ecuador es un país que dispone de un recurso genético impresionante y que se debe tomar con la mayor precaución porque no solo es valioso para el país sino también para la

humanidad. Estos análisis muestran como el país debe tomar acciones para combatir este problema y enfocarse en soluciones que vayan de la mano con lo expuesto en la constitución del Ecuador (MAE, 2011).

Gracias a las entidades encargadas de llevar el registro histórico del clima, es posible analizar las evidencias de que el país se ha visto vulnerado por los efectos de la variabilidad climática. Los datos muestran que los indicadores climáticos se han manifestado de distintas maneras, por ejemplo, la región litoral o costa del país presenta valores de cambio de la tendencia establecida por el INAMHI en 2007 (periodo 1960 – 2006), no obstante, la tendencia en la mayor parte del país sigue siendo positiva (lo cual indica incremento), a excepción de la estación Chone que pasó de una tendencia positiva a una negativa (2% a -3%). En la estación Portoviejo existe un incremento del 47% con respecto a los resultados de 2007, en promedio, el valor de cambio de la precipitación de la región litoral es del 33% (indica tendencia al incremento) (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2017).

Por otro lado, en base a la misma Comunicación Nacional de 2017 se menciona que la Amazonía es la más estable en lo referente a precipitación ya que “el valor de cambio de la precipitación es variable en un rango comprendido entre 6%, en la estación El Puyo, y un valor de -6%, en la estación Sangay. Se tiene datos únicamente de tres estaciones. En promedio, el valor de cambio de la precipitación es de -1%” así mismo en cuanto a temperatura se refiere, se manifiesta que “El valor de cambio de la temperatura media es positivo en las tres estaciones que se monitorean en esta región, con datos que oscilan entre 0,8°C, en El Puyo, y 1,1°C en Sangay. En promedio, el valor de cambio para la temperatura media en las estaciones monitoreadas alcanza a 0.9°” (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2017).

De igual manera, continuando con la región interandina, o comúnmente llamada simplemente sierra, se menciona en la Comunicación Nacional de 2017 que, “La precipitación presenta una distribución irregular, registrando valores de cambio más negativos al norte de la región interandina, con porcentajes que varían entre -36% y -24% en las estaciones El Carmelo y El Ángel, respectivamente, así como en la estación Chunchi, con -11%, Cañar, con -3%, y Celica y Yangana, con -16% y -23%. En el resto

de la región la tendencia es positiva con valores que oscilan entre 2%, en la estación Guaslán, y 68% en la estación Gonzanamá. En promedio, la región interandina experimenta una tendencia positiva del valor de cambio de la precipitación del orden del 13% (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2017).

Así mismo, en dicha comunicación también se menciona que las temperaturas medias registran, mayoritariamente, valores de cambio que se incrementan conforme transcurre el tiempo. Los valores más altos se encuentran en las estaciones Tulcán, con 1,8°C; Ambato, con 4,1°C y Cuenca, con 2,4°C. En el resto de la región interandina los valores oscilan entre 0,3°C, que es el caso de la estación Cariamanga, y 1,1°C, en la estación Cañar. En promedio, esta región registra un valor de cambio positivo de 1,1°C para la temperatura media (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2017).

Por otra parte, el Distrito Metropolitano de Quito, tiene gran importancia política, social y cultural, además de ser el hogar de 3'228.233 de habitantes aproximadamente de acuerdo con los datos del Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC) (Instituto Metropolitano de Planificación Urbana, 2019), constituye un área en constante expansión que demanda muchos más recursos y que por tanto se puede decir que contribuye con el calentamiento global en cierta medida, por este motivo y de acuerdo a su situación geográfica, se reconoce que Quito enfrenta una expansión territorial, urbana y humana conteniendo articulaciones entre el sector rural y urbano además de vínculos con los cantones que lo colindan (Instituto de La Ciudad, 2013).

El Distrito Metropolitano se encuentra ubicado en una situación geográfica que experimenta, además de constantemente anomalías climáticas, zonas en las cuales alberga microclimas, que afectan al sistema socioeconómico de la ciudad. Dichos factores se manifiestan en la ciudad de Quito en forma de períodos con lluvias anormalmente abundantes o intensas, así como también en forma de sequías extremas que inclusive han generado situaciones de desastre e impactado en forma negativa con una magnitud considerable hacia los diferentes sectores socioeconómicos. Estas mencionadas anomalías se ven estrechamente asociadas a fases extremas, o dicho de otra forma, eventos extremos de la variabilidad climática, manifestados en ciclos con diferentes períodos de tiempo, desde décadas, años, meses e incluso semanas. A pesar de las

evidencias de tales anomalías climáticas que ocurren en la región (Hidalgo, 2017), muchos autores consideran que es pertinente continuar realizando estudios detallados sobre la variabilidad climática que está presente en el Distrito Metropolitano de Quito.

1.6 Efecto Isla de Calor Urbana

La definición clara del efecto Isla de Calor Urbana se menciona en el artículo “El estudio de la isla de calor urbana en el ámbito mediterráneo: una revisión bibliográfica”, cuyos autores comentan que “la ICU es un fenómeno de origen térmico que se desarrolla en las áreas urbanas causado por la diferencia de temperatura existente entre los sectores más densamente edificados de la ciudad (centro) y la de sus alrededores (MDMQ, 2014); Así pues, la ICU es un fenómeno de contraste térmico entre lo urbano y lo rural, este se debe principalmente a tres factores: el primero es la producción directa de calor por combustión proveniente de los automóviles de la ciudad, el segundo refiere al desprendimiento gradual del calor almacenado durante el día en las construcciones ya sean de ladrillo, hormigón o demás materiales similares y por último a la radiación que es devuelta a la superficie terrestre causada por la reflexión en la capa de impurezas atmosféricas. (Juan Antonio Serra Pardo)

A su vez, uno de los efectos de las ICU, corresponden a exacerbar la acción de los contaminantes, así pues los PM10 y PM 2,5 constituyen una amenaza para la población en general, pero en especial para los pacientes crónicos de enfermedades cardiovasculares y respiratorias que se encuentran expuestos dentro de la ciudad, los autores Romero y Sarricolea plantean en su estudio que existe una relación logarítmica entre las temperaturas atmosféricas (que sufren variación a causa del efecto ICU) y el material particulado, identificando que en las zonas más densamente construidas se presentan mayores valores tanto de temperatura, como de material particulado en comparación con otras zonas en donde los niveles de construcción son menores (Romero & Sarricolea, 2016).

Existen estudios dedicados a analizar las tendencias de comportamiento a corto y mediano plazo para América Latina, de estas se puede identificar fácilmente que uno de los mayores problemas presentes y que se encuentra en crecimiento es el aumento de la

densidad poblacional y por consecuencia el desarrollo de las ciudades, las capitales en especial sin darse cuenta están aportando con el “Efecto ICU” y esto se debe a que al crecer en cuanto a su desarrollo urbano, las estructuras de cemento y hormigón, así como también áreas residenciales pavimentadas tienen la capacidad de retener el calor absorbido durante el día y consecuentemente producen olas de calor a los lugares y zonas aledañas, absorción que aumenta día tras día debido a la creciente radiación solar en las zonas altas de América Latina y a la falta de nubosidad de algunas zonas.

De esta forma se puede relacionar el concepto con el área de estudio de este trabajo, ya que el Distrito Metropolitano de Quito ha registrado un gran crecimiento urbano de tal forma que la ciudad se ha expandido en norte, sur, este y oeste incrementando infraestructura en el hipercentro y muchos más puntos de vivienda en los extremos norte y sur, es así que además su distrito financiero registra un crecimiento hacia lo alto y demandando más sitios de reunión pública y vías de acceso a ellas, de esta forma es como el Distrito Metropolitano de Quito es partícipe y víctima del efecto ICU, el mismo que se ve alimentado por varios factores climáticos propios del calentamiento global.

1.6.1 Crecimiento Urbano

El crecimiento urbano que se registra en el Distrito Metropolitano de Quito también contribuye al cambio climático que a su vez influye al efecto ICU puesto que, como se había mencionado el aumento de población es considerable en los últimos 30 años, así lo manifiestan los datos históricos almacenado por el INEC indicando que la población del Distrito Metropolitano de Quito hasta el año 1982 fue de 1'382.125 habitantes, mientras que para el 2010 esta cifra aumentó considerablemente hasta llegar a los 2'576.287 habitantes, los mismos que demandan una gran cantidad de recursos y servicios que han hecho incluso que parques y áreas verdes se vean reemplazados por vías y viviendas, además de locales de comida y otros trabajos, colaborando con el aumento en la presencia del efecto ICU (INEC, 2010).

1.6.2 Ausencia de Áreas Verdes

La disminución de áreas verdes en ciertas zonas del Distrito Metropolitano de Quito contribuye con el efecto ICU que a su vez potencia al Cambio Climático debido a que los materiales con los cuales se han construido tanto calles como edificios e infraestructura almacenan el calor recibido durante el día provocando que las noches sean más cálidas, caso contrario sucede en las zonas periféricas donde la presencia de áreas verdes permite que no se retenga el calor del día y por lo tanto se tengan noches más frescas comparadas con la ciudad, también, dicha retención de temperatura tiende a exagerar los extremos de calor en el verano y de los de frío en invierno además de obligar a los habitantes a aumentar la demanda de aparatos como calefactores o aires acondicionados entre otros.

De esta forma, en el apartado “Previsiones Sobre el Patrimonio Natural” del documento “Diagnóstico de la Situación Forestal del Distrito Metropolitano de Quito DMQ” se manifiesta que Quito ha perdido en 23 años (1986 – 2009) aproximadamente 83 809 ha. de cobertura vegetal como resultado de una serie de factores socioeconómicos y político institucionales como: expansión urbana y de la frontera agrícola, tala ilegal de madera y falta de control forestal, explotación de canteras y proyectos de minería metálica, proyectos hidroeléctricos, construcción de vías, incendios forestales; entre otros factores que han provocado el deterioro de la cobertura vegetal, reflejada en procesos como: la fragmentación, deforestación, disminución de poblaciones y extinción de especies, reduciendo por lo tanto los hábitat, composición y estructura de los bosques del DMQ” (Secretaría De Ambiente, 2013).

Tomando estos datos en consideración junto con estudios de análisis climático tenemos que en el año 2012 se registra una temporada de sequía producto de una fuerte época de verano con la presencia de temperaturas altas además de baja humedad relativa, dando como consecuencia que el Distrito Metropolitano de Quito perdió un aproximado de 4.882 ha., de cobertura vegetal, la misma que se la podía clasificar como vegetación natural y plantaciones, gran parte de este número presentado se atribuye a que las condiciones climáticas favorecieron alrededor de 1.182 incendios (Secretaría De Ambiente, 2012).

1.7 Descripción de la zona de estudio

El Distrito Metropolitano de Quito (DMQ) se encuentra geográficamente ubicado en una extensión atribuida al nombre de valle de Quito, dicho valle este considerado parte de la Hoya de Guayllabamba, además tiene la particular característica de encontrarse rodeado en su ladera occidental por el volcán activo Pichincha, perteneciente justamente a la Cordillera Occidental de los Andes (Yates, 2013).

De esta forma el territorio del Distrito Metropolitano de Quito actualmente consta de ocho administraciones zonales las mismas que se encargan de 65 parroquias, estas a su vez se encuentran divididas en dos grupos, 32 son urbanas y 33 son consideradas rurales siendo así que el Distrito Metropolitano de Quito registra un desarrollo urbano y demográfico importante desde los años 60, que además en la actualidad se ha adjudicado características de ciudad difusa, esto se debe a su desarrollo físico expansivo que resulta inequitativo y con baja densidad presentando deficiencias tanto funcionales como ambientales para el Distrito Metropolitano, por ejemplo, el uso de recursos no renovables, la utilización urbanística de territorios rurales mencionados anteriormente en este artículo, el sobre equipamiento y saturación de servicios en el hipercentro de la ciudad (Secretaría de Territorio, Hábitat y Vivienda, 2012) son varias de las causas que definen la situación actual del Distrito Metropolitano de Quito y son justamente estas las que tienen un efecto sobre los datos de las variables climáticas obtenidos de estaciones ubicadas a lo largo del mismo.

1.8 Índices de Cambio Climático

Se conoce que un índice se representa por la relación de dos o más indicadores, por lo tanto, un índice de variabilidad climática nos da a entender que existe cambio climático. Para este trabajo es necesario comprender de mejor manera que son los índices climáticos propuestos por el Grupo de Expertos en Detección e Índices de Cambio Climático (ETCCDI) del IPCC detallando que determinan, como funcionan y cómo van

a ser utilizados a lo largo de esta investigación, y sobre todo como serán utilizados dentro de la herramienta climática propuesta para este análisis estadístico (WCRP, 2019).

1.8.1 Tn90p

Este índice muestra la temperatura mínima diaria dentro de un mes mientras que este figure en un año dentro del percentil 90 Tn90p, y se encuentre centrado en una ventana de 5 días (También se recomienda calcularlo usando el método del Anexo D del manual del usuario de ClimDex), para este el porcentaje del tiempo se determina si se cumple que: $T_{nij} > T_{nin90}$.

1.8.2 TNx

Este indicador significa Temperatura Mínima Más Alta, por lo tanto, menciona a la temperatura mínima diaria TN de un mes dentro de un período, por lo tanto, la máxima temperatura mínima diaria de cada mes cumple: $TN_{xkj} = \max (T_{nkj})$.

1.8.3 Tx90p

Este índice manifiesta la Temperatura Máxima Diaria dentro de un periodo y sea el día calendario ubicado en el percentil 90 Tx90p, y que además este centrado en una ventana de por lo menos 5 días (También es recomendado verificar como realizar el cálculo usando el método del Anexo D del manual del usuario de ClimDex), de este se determina el porcentaje del tiempo cuando se cumple: $T_{xij} > T_{xin90}$.

1.8.4 TXx

Este indicador se llama Temperatura Máxima Extrema, esta menciona a la temperatura máxima diaria TX dentro de un mes en un periodo, por lo tanto, se cuenta la máxima temperatura máxima diaria cada mes cumpliendo: $TN_{xkj} = \max (T_{nkj})$.

1.8.5 DTR

Este índice significa Intervalo Diurno de Temperatura (Diurnal Temperature Range) y manifiesta la resta de las temperaturas registradas diarias máximas y mínimas respectivamente del día del periodo de datos ingresados, el intervalo se representa si se

cumple entonces:
$$DTR_j = \frac{\sum_{i=1}^I (Tx_{ij} - Tn_{ij})}{I}$$

1.8.6 CDD

Este índice corresponde a los Días Secos Consecutivos (Consecutive Wet Days), muestra la cantidad diaria de precipitación dentro de un día en el periodo a analizar, el más grande número de días consecutivos se cumple cuando: $RR_{ij} < 1\text{mm}$.

1.8.7 R95pTot

Este índice representa los Días Muy Lluviosos registrados, es decir la cantidad diaria de precipitación presente en un día lluvioso dentro del periodo dentro del percentil 95th de precipitación registrados en los días lluviosos dentro del periodo 1961-1990, para esto se cumple entonces que:

$$R95 p_j = \sum_{w=1}^W RR_{wj} \text{ Donde } RR_{wj} > RR_{wn95}$$

1.8.8 R99pTot

Este índice a diferencia del anterior representa los Días Extremadamente Lluviosos, por lo tanto, la cantidad diaria de precipitación de un día lluvioso dentro del periodo a analizar y que se incluye en el percentil 99 de precipitación de los días lluviosos

comprendidos en el periodo 1961-1990, este representa la sumatoria del número de días extremadamente lluviosos dentro del periodo, por lo tanto, se debe cumplir que:

$$R99 p_j = \sum_{w=1}^W RR_{wj} \text{ Donde } RR_{wj} > RR_{wn}!$$

1.8.9 R20

Este índice menciona la cantidad diaria de precipitación mayor a 20mm - considerada como una lluvia abundante para Quito- dentro de un periodo, por lo tanto, para poder encontrar la cantidad mayo de precipitación se debe cumplir que: $RR_{ij} \geq 20mm$. Donde RR_{ij} , es la cantidad de precipitación registrada en un día i , en un mes j .

1.9 Relación entre los Índices y el Cambio Climático

A continuación, mediante el siguiente cuadro se muestra la relación entre los índices y el cambio climático.

Tabla 1:

Relación entre los índices y el cambio climático.

Índice	Unidad	Relación
Temperatura Mínima Diaria Sobre el Percentil 90th (Tn90p)	°C/mes	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.
Temperatura Mínima Más Alta en Cada Mes (TNx)	%/mes	
Temperatura Máxima Diaria Sobre el Percentil 90th (Tx90p)	°C	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—.
La Máxima Temperatura de Cada Mes (TXx)	%	
Rango Diurno de Temp. Máx. Menos Temp. Min Mensual (DTR)	Días	Se espera la disminución del DTR como consecuencia directa del aumento del calentamiento nocturno (aumento de temperaturas mínimas). Por otro lado, la disminución en DTR puede deberse a la reducción de la insolación diurna a través del engrosamiento de la cobertura nubosa gris (que generaría disminución de las temperaturas máximas). Para llegar a conclusiones es necesario revisar los valores de temperaturas máximas y mínimas.
Número de Días Secos Consecutivos Registrados (CDD)	Días	Los GEI forzan un incremento de la temperatura generando incremento de evaporación, favoreciendo potencialmente a las sequías.
Días Muy Húmedos Registrados (R95pTot)	mm	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.
Días Extremadamente Húmedos (R99pTot)	mm	
Número de Días Con Una Precipitación mayor/igual a 20mm (r20mm)	°C	

Fuente: (Serrano S. , y otros, 2012)

Elaboración: El Autor

Capítulo Segundo

1. Área de Estudio y Metodología

En este capítulo se mencionan las características del área de estudio y su metodología. Cabe mencionar que estos dos componentes van de la mano, ya que dentro del área de estudio se encuentran las estaciones meteorológicas que posteriormente proveerán de insumos, en este caso los datos meteorológicos de la serie de tiempo, mismos que deben ser ajustados para trabajar en conjunto y aplicar la óptima metodología con el fin de general resultados altamente fiables.

1.1 Área de Estudio

El área de estudio propuesta para este trabajo es el Distrito Metropolitano de Quito, este se encuentra ubicado en la Provincia de Pichincha, específicamente en el sector centro norte de la misma, actualmente abarcando un poco más de 31% de su superficie que corresponde a 424.062 ha (Secretaría de Ambiente, 2012) aproximadamente, además, debido a que es la capital del Ecuador aloja una población estimada de 2'239.191 habitantes que residen en 764.180 viviendas hasta el momento con una tendencia hacia el crecimiento demográfico y urbano que demanda un incremento considerable de equipamiento y servicios. La Secretaría del Ambiente en su portal menciona que el Distrito Metropolitano de Quito contiene una marcada área edificada que represente alrededor de 24.732 hectáreas, esto equivale a un 5,8% de todo el territorio incluyendo así también los espacios verdes urbanos que juntos suman alrededor de 3.697 hectáreas, cifra que de acuerdo a la visión de Quito 2040 debería aumentar.

Adicionalmente la Secretaría del Ambiente también menciona que, con la elevada curva de crecimiento de la ciudad, la presión sobre las áreas verdes y ecosistemas aledaños se ha incrementado por parte de las urbes, alcanzando así la cifra de 800 hectáreas por año, implicando una reducción en la mancha verde del Distrito Metropolitano e incrementando la presencia de asfalto, concreto y otros materiales.

De acuerdo con el documento Red Verde Urbana se conoce que: “Quito tiene un clima llamado “primaveral” durante todo el año, debido a que la temperatura oscila entre 26°C en el día y la noche es de 7°C promedio. Se divide en dos estaciones: Estación lluviosa más fría (2°C de diferencia) periodo de 8 meses (noviembre a junio); y la estación seca más caliente dura un periodo de 4 meses (julio a octubre)”, de esta forma se muestra como es el Distrito Metropolitano de Quito en cuanto a sus condiciones climáticas (MDMQ, 2014).

Es necesario tomar en cuenta que la topografía donde se asienta el Distrito Metropolitano hace que éste no posea un clima extremo, adicionalmente el documento del Municipio de Quito “Red Verde Urbana” menciona que las estrategia bioclimáticas futuras para aplicar en la ciudad respecto al acondicionamiento del espacio público, así como también de las edificaciones, no deben considerar un grado muy alto de sofisticación; sin embargo, no se debe descartar los materiales de construcción que actualmente aloja el Distrito Metropolitano, que ya que estos pueden contribuir de cierta manera al efecto ICU (MDMQ, 2014).

A continuación, se muestra en la figura la delimitación de la zona de estudio donde dentro de esta se encuentran distribuidas las estaciones meteorológicas consideradas para la obtención de datos que serán el insumo principal para la elaboración de este trabajo.

Ilustración 2:

Mapa de ubicación de la zona de estudio.



Fuente: (MDMQ, 2011)

Elaboración: Municipio del Distrito Metropolitano de Quito

Los datos de las mencionadas variables climáticas son captados y almacenados por estaciones ubicadas a lo largo y ancho del Distrito Metropolitano de Quito. Para este trabajo se han considerado las estaciones Carapungo al norte, Iñaquito centro-norte, Izobamba al sur, Chillos al suroriente, Tumbaco y la Tola al nororiente del Distrito Metropolitano de Quito, por lo que de esta manera se cubre toda el área de estudio propuesta ya que cada zona del área del distrito tiene particularidades climáticas incluyendo microclimas como es el caso de los Chillos o Tumbaco con climas diferentes a los registrados en la ciudad. A continuación, se muestra un cuadro con los nombres de las estaciones consideradas con su respectivo código de estación y ubicación tanto en latitud como en longitud, seguido por el mapa de ubicación geográfica de las mismas.

Tabla 2:

Estaciones de la zona de estudio con datos diarios y con series de tiempo mayores a 20 años.

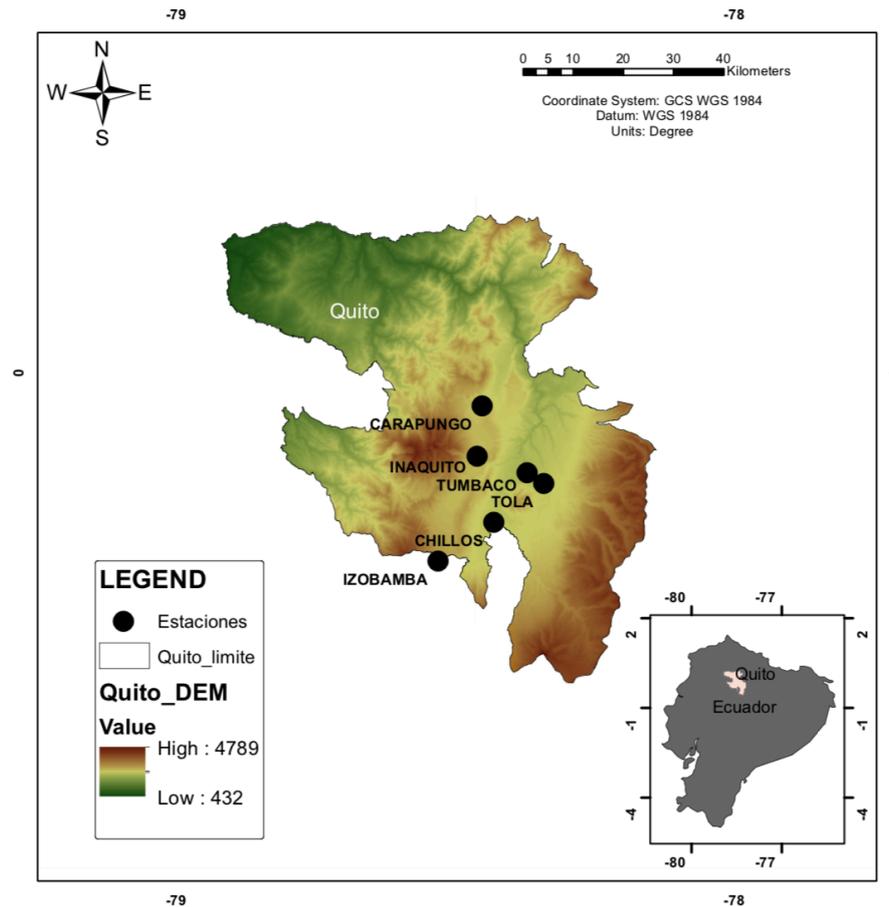
	Estación	Código	Longitud	Latitud
1	Carapungo	M5036	-78.48	-0.09
2	Chillos	M5041	-78.46	-0.3
3	Iñaquito	M0024	-78.49	-0.18
4	Izobamba	M0003	-78.56	-0.37
5	Tola	M0002	-78.37	-0.23
6	Tumbaco	M5040	-78.4	-0.21

Fuente: (INAMHI, 2015)

Elaboración: El Autor

Ilustración 3:

Mapa de ubicación geográfica de las estaciones en la zona de estudio.



Fuente: (INAMHI, 2015)

Elaboración El Autor

1.2 Metodología

Tomando en cuenta las preguntas de investigación, este trabajo se enfoca en realizar un análisis estadístico de tendencias de aumento o disminución los Índices de Cambio Climático relacionados con los cambios de la temperatura y precipitación en la zona de estudio, con el fin de proporcionar respuestas fiables ya sean de evidencia de incremento o incremento negativo, que puedan ser una guía para futuros trabajos de investigación, además de analizar el comportamiento de eventos extremos como son días muy lluviosos o noches de mucho calor por poner unos ejemplos, tomando como base a los datos de temperaturas máximas, mínimas y de datos de precipitación proporcionados

por el INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología) y posteriormente analizándolos bajo los parámetros recomendados por el ECTCCDI.

Cabe mencionar que para continuar con el estudio estadístico propuesto se utilizarán datos actuales obtenidos principalmente del INAMHI, seleccionando de entre sus 52 estaciones comprendidas dentro del DMQ a las que proporcionen las series de tiempo más largas disponibles, tomando en cuenta que al tratarse de un estudio climático estadístico, lo óptimo es trabajar con series de datos de 20-30 años o más, para obtener resultados lo más acertados posible y ofrecer un análisis exacto, es así entonces que este trabajo considera a las estaciones La Tola, Izobamba e Ñaquito como de largo período (20 años) mientras que Chillos, Carapungo y Tumbaco como de corto período (15 años).

Por consiguiente, una vez que se ha realizado el levantamiento de información de fuentes oficiales, como lo son el Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, el INAMHI y la Secretaría del Ambiente, se procede a prepararlos para que puedan ser totalmente utilizables en el software estadístico que analiza datos climáticos, es decir se utilizará para este trabajo el software Climdex basado en la plataforma R-Studio con el fin de tener un análisis de datos de calidad y que así mismo sean sus resultados obtenidos. En este apartado se detalla como los datos han sido preparados para evitar sesgo o errores ya sean provenientes tanto del software estadístico como de la calidad de información recopilada y como estos serán presentados para su respectiva explicación dentro del capítulo de resultados.

1.3 Descripción de las herramientas

A continuación, se presenta una breve característica de las herramientas computacionales que serán utilizadas para el análisis estadístico de del presente trabajo.

1.3.1 RStudio

RStudio es un entorno de desarrollo integrado (IDE) en lenguaje de programación R, este es un programa de código que incluye una consola de mandos así como también

un editor con la capacidad de resaltado de sintaxis con lo cual se puede crear un libreta o script de programación que admite la ejecución directa de código, además cuenta con muchas herramientas que resultan ser de gran ayuda para el trazado, el almacenamiento del historial y la depuración además claro de la gestión del espacio en el cual se realiza el trabajo.

Por otra parte, RStudio tiene como fortaleza el tratamiento estadístico de los datos, con una infinidad de recursos de gran calidad y que brindan facilidad para la creación de archivos que se pueden exportar a formato HTML, PDF, por supuesto documentos de Word y también presentaciones de diapositivas en Power Point lo que lo hace un excelente aliado para el usuario que realiza el análisis de los resultados estadísticos que arroja, así mismo RStudio soporta gráficos interactivos que trabajan con Shiny y ggvis por lo que es un programa bastante completo y útil que se encuentra disponible tanto en código abierto como en respectivas ediciones comerciales, además se lo puede ejecutar en el escritorio (ya sea de Windows, Mac o Linux) o también en cualquier navegador conectado a RStudio como lo es Server o RStudio Server Pro (RStudio, 2018).

1.3.2 Climdex

Climdex es una librería integrada en RStudio, desarrollada por el ECTD del IPCC fácil de usar para cálculos que demandan ciertos parámetros específicos, por ejemplo, el de índices de extremos climáticos y además para monitorear y detectar variabilidad de cambio climático gracias a su facilidad para generar gráficas. Climdex es un programa de análisis desarrollado por Byron Gleason del National Climate Data Centre (NCDC), y ha sido usado en talleres sobre indicadores climáticos desde el año 2001, uno de los objetivos principales de este programa es el de construir índices de extremos climáticos, los cuales son de gran importancia en estudios de monitoreo y detección de cambios climáticos en muchas partes del mundo, por lo tanto para que el programa funcione correctamente se requiere que los índices sean estandarizados (Climate Research Branch Environment, 2004).

Para las versiones más recientes de Climdex únicamente se incluye un procedimiento simple de control de calidad de datos, antes de que los índices sean

calculados, este software de análisis incluye un manual de usuario con instrucciones paso a paso sobre la instalación del programa, el establecimiento del ambiente para el usuario, el control de calidad de los datos (recordando que estos deben ser datos climáticos diarios) y por último una guía sobre el cálculo de los 27 índices básicos. Por otro lado, se considera que la incertidumbre asociada con este método de cálculo de la tendencia depende del perfil de curva correspondiente a la serie de tiempo de cada índice, correspondiente a cada celda de datos en cuestión. Es importante aclarar que la incertidumbre dependerá de si la serie de tiempo con la que se va a trabajar es lo suficientemente larga, de esta manera el signo y magnitud pueden permanecer invariables (Climate Research Branch Environment, 2004).

1.4 Proceso de Análisis

A continuación, se muestra un gráfico de proceso que resume la metodología utilizada para este trabajo con el fin de comprender fácilmente el proceso del análisis de datos. A continuación, se detallan cada uno de los bloques.

Ilustración 4:

Proceso metodológico para el análisis de datos.



Fuente: el Autor

Elaboración: El Autor

1.4.1 Recopilación de Datos.

Los datos climáticos fueron seleccionados de las estaciones que cumplen requisitos mínimos tales como: a) que la estación esté funcionando correctamente en su zona, registrando un mínimo de un 70% de datos válidos, b) encontrarse dentro del área de estudio propuesta, c) contener datos históricos de por lo menos 20-30 años con una resolución mínima horaria, según las recomendaciones del ETCCDI/CRD (Expert Team on Climate Change Detection and Indices), d) que dichos datos se encuentren en óptimas condiciones (es decir que los archivos no se encuentren corruptos, estén en un formato compatible y además que no tengan alteraciones por parte de terceros, ni demasiados vacíos en la serie de tiempo), y e) contengan información que refiera a variables de precipitación, temperaturas mínimas y temperaturas máximas.

Los datos provenientes de la Secretaría del Ambiente (Chillos, Tumbaco Y Carapungo) han sido recopilados con el siguiente formato: Fecha, Precipitación, Temperatura Máxima y Temperatura Mínima.

Debido a que estos se encuentran en registros horarios se procede a utilizar la familia de comandos para la temperatura T que son apply y cut de la plataforma R-Studio con el fin de extraer los valores diarios mínimo y máximos de temperatura y acumular precipitación diaria. Se debe considerar que los valores vacíos en este caso se toman como “Inf” puesto que para calcular la acumulación ya sea de mínimos o máximos se omiten los valores con la orden NA que el software reconoce como “No Disponible”, estos valores omitidos corresponden a las cantidades de precipitación diarias menores que cero y la temperatura máxima diaria menor que temperatura mínima diaria.

A continuación, se presenta un diagnóstico de los datos que será utilizados para el análisis estadístico en forma de tabla, que muestra los parámetros de clasificación de los datos, separándolos además en las distintas estaciones designadas para el presente trabajo. Dentro de los parámetros se destacan los valores mínimos encontrados, el promedio de

datos correspondientes a cada estación, los datos con valores máximos y el número de datos a los que se les asigna el valor NA así como también su porcentaje, cabe mencionar que algunas celdas contienen el valor “Inf” lo cual significa que existe una falta de datos, sin embargo, se espera que esto no influya sobremanera al momento de realizar el análisis estadístico debido a que Climdex trabaja de acuerdo a percentiles justamente para evitar errores y ofrecer un buen resultado del análisis.

Tabla 3:

Resumen del diagnóstico de datos de las estaciones propuestas.

Parámetro	Iñaquito Prec.	Iñaquito Tmax	Iñaquito Tmin
Min.	0	11	4
1st Qu.	0	205	92
Media	0	218	102
Mean	3007	2165	1007
3rd Qu.	24	23	11
Max.	75	297	155
NA's	163	253	193
NA's(%)	154	239	182
Parámetro	Izobamba Prec.	Izobamba Tmax	Izobamba Tmin
Min.	0	9	-43
1st Qu.	0	174	51
Media	4	186	65
Mean	3996	1846	629
3rd Qu.	53	198	76
Max.	845	242	114
NA's	3	40	19
NA's(%)	3	38	18
Parámetro	Tola Prec.	Tola Tmax	Tola Tmin
Min.	0	138	16
1st Qu.	0	216	85
Media	0	23	10
Mean	2315	2281	9654
3rd Qu.	13	242	11
Max.	68	295	16
NA's	14	30	31
NA's(%)	13	28	29
Parámetro	Carapungo Prec.	Carapungo Tmax	Carapungo Tmin
Min.	0	104	5.74
1st Qu.	0	194	10.15
Media	0	2059	10.92
Mean	1822	2051	Inf
3rd Qu.	9	2172	11.55
Max.	837	2634	Inf
NA's	5478	5598	5478
NA's(%)	5172	5285	51.72
Parámetro	Chillos Prec.	Chillos Tmax	Chillos Tmin
Min.	0	1027	-0.45
1st Qu.	0	2056	8.7
Media	0	2224	10.57
Mean	3298	22	Inf
3rd Qu.	26	2362	11.94
Max.	692	2787	Inf
NA's	5478	5494	5478
NA's(%)	5172	5187	51.72
Parámetro	Tumbaco Prec.	Tumbaco Tmax	Tumbaco Tmin
Min.	0	1245	0.87
1st Qu.	0	2158	10.05
Media	0	2302	11.65
Mean	2014	229	Inf
3rd Qu.	1	2439	12.83
Max.	52	2885	Inf
NA's	5478	5504	5478
NA's(%)	5172	5196	51.72

Fuente: el Autor

Elaboración: El Autor

1.4.2 Uniformización de datos a formato estándar.

El periodo de datos elegido para este trabajo comprende desde 1988-01-01 a 2019-06-01, que incluye una cantidad de datos recomendable para un óptimo estudio. Se debe mencionar que en los resultados se obtendrán graficas que presenten esta línea temporal los cuales representan la unión de los datos obtenidos de las estaciones controladas tanto por el INAMHI como por la Secretaría del Ambiente.

Haciendo una aclaración, las estaciones INAQUITO, IZOBAMBA y LA TOLA se presentan con la disposición del INAMHI de mantener su propio formato, este considera una tabla separada con columnas que consecutivamente almacenan datos anuales, mensuales y diarios, independientemente de las variables que también se incluyen, estos se presentan de la siguiente manera:

Tabla 4:

Formato de datos obtenidos de las estaciones Iñaquito, Izobamba Y La Tola

Año	Mes	Dia1	Dia2	Dia(n)
-----	-----	------	------	--------

Fuente: el Autor

Elaboración: El Autor

Por cuanto deben ser llevadas al formato:

Tabla 5:

Formato estandarizado para los datos de las estaciones del INAMHI

Fecha (Día)	Precipitación	T. Máxima	T. Mínima
-------------	---------------	-----------	-----------

Fuente: el Autor

Elaboración: El Autor

1.4.3 Control de calidad de los datos.

Una vez que el software RClimdex ha sido cargado en el computador, aparecerán tres opciones referentes al control de datos, cálculo de índices y salida. Para realizar el control de calidad de datos se elige la primera opción que es “Load Data and run QC (quality control)”. Dentro de este submenú se debe elegir crear una fecha ideal, es decir, una opción con el fin de que se alojen cronológicamente los registros en los cuales los valores vacíos son NA, de esta forma al unir la información de los registros de las estaciones del INAMHI con la de los registros proveídos por la Secretaría del Ambiente solo se deben sustituir los “Inf” por “NA” en las tablas de datos de la Secretaría. Por último, estos datos se refinan sustituyendo los valores negativos de precipitación y valores de temperatura mínimos mayores a los máximos por NA, todo este proceso se realiza tomando en consideración lo mencionado en el manual de usuario de Climdex.

De la misma manera, se realizó un script que identificaba y eliminaba aquellos valores en los que la temperatura máxima era menor que la mínima, y aquellos casos en los que la precipitación era negativa.

1.4.4 Computo en Climdex sobre la plataforma RStudio.

Antes de empezar a utilizar el software Climdex se considera tener las fechas en formato PCICt para posteriormente llevar los datos de las estaciones de formato normal a formato CI, todo esto se realiza utilizando el paquete climdex.pcic, una vez ya con los datos en formato CI, se procede a aplicar los 27 índices de cambio climático mencionados por ETCCDI, de igual manera posteriormente los valores infinitos son sustituidos por NA de acuerdo a lo mencionado en el manual (Climate Research Branch Environment, 2004).

Se considera necesario mencionar que, si bien se procede a aplicar los 27 índices de cambio climático, únicamente se analizarán 9, esto se debe a que muchos de los índices mencionados no se consideran aplicables para la zona de estudio propuesta, por ejemplo, el Distrito Metropolitano de Quito se encuentra ubicado en la sierra ecuatoriana por lo que analizar el índice “Noches Tropicales” que se refiere a aquellos días en que la

temperatura mínima supera los 20°C, sería en vano ya que las estaciones no van a registrar datos relevantes para un indicador de clima tropical debido a geografía del Distrito Metropolitano a pesar de que si se registra un clima Tropical Andino para la Provincia, de la misma forma no se aplican muchos de los demás índices ya que al igual que con este ejemplo no juntan las condiciones para un análisis. Sin embargo, todos los índices se describen en el Anexo 1 de este trabajo.

Las estadísticas a ser generadas por el software Climdex se encuentran con las funciones base de RStudio sin la necesidad de paquetes externos, de esta forma naturalmente se encuentra el valor R^2 (que quiere decir la bondad del ajuste del modelo resultante con respecto a la variable que se pretender explicar), y por otra parte con el paquete “tren” se encuentran los valores tau `sen_slope` (estadística que determina la pendiente de la recta de los datos en el rango de tiempo propuesto) y p-value (estadística que determina el nivel de significación de los datos proporcionados por las estaciones).

1.4.5 Exportación de valores.

Una vez obtenidos los datos resultantes del proceso de análisis estadístico de Climdex se procede a su respectivo acondicionamiento con el fin de poder exportarlos en formato .csv que es un formato delimitado por comas el cual es compatible universalmente con todos los programas, los índices se exportan posteriormente en una tabla de la siguiente forma:

Tabla 6:

Formato de compatibilidad de datos de los Índices Climáticos

date	INAQUIT	IZOBAMB	TOLA	CARAPUNG	CHILLOS	TUMBAC
1/1/1989	NA	10.716129	11.19	NA	NA	NA
2/1/1989	10.5962963	10.5357143	11	NA	NA	NA

Fuente: el Autor

Elaboración: El Autor

De igual manera se representan los datos estadísticos provenientes del análisis con ClimDex, en los cuales se menciona a R2 que es el coeficiente de determinación utilizado para predecir futuros resultados, a tau que es el coeficiente de correlación por rangos, pvalue o mejor dicho valor p que ayuda a diferenciar y descartar los resultados que son producto del azar del muestreo y finalmente sen_slope (pendiente) que es utilizada para determinar la pendiente:

Tabla 7:

Formato de presentación de estadísticas para cada Índice.

index	R2	tau	pvalue	Pendiente
CDD	0.348	-0.5877538	0.03514007	0
TNx	NA	NA	NA	0

Fuente: el Autor

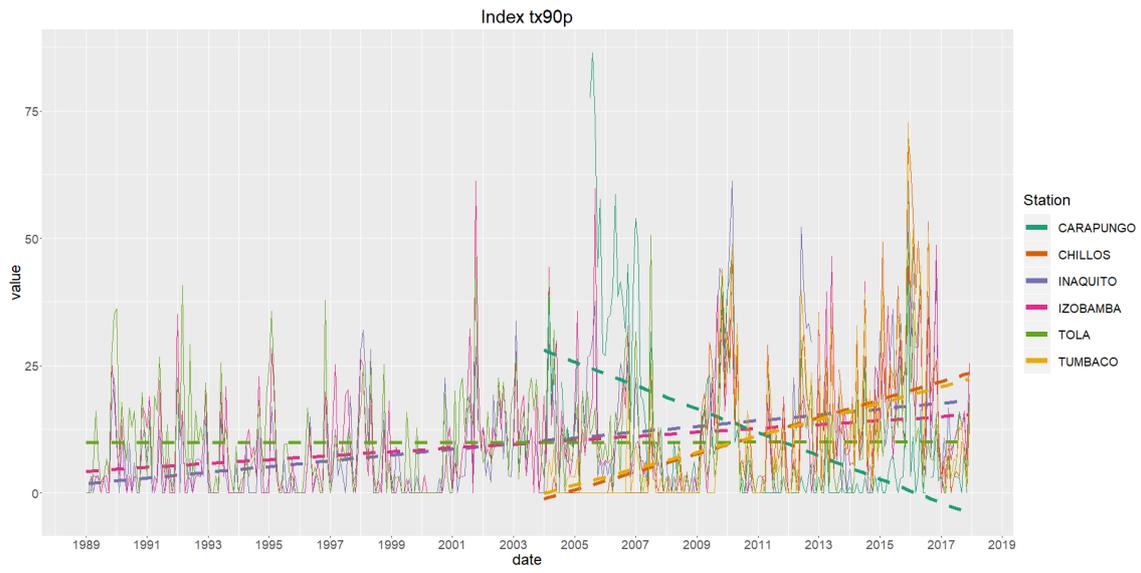
Elaboración: El Autor

1.5 Realización de gráficos.

Para realizar las gráficas resultantes del procesamiento de datos en Climdex, es necesario ordenar alfabéticamente las curvas obtenidas, además a estas graficas se agrega la línea de tendencia de cada uno de cada uno de los índices por estación, el resultado final se presenta de la siguiente forma:

Ilustración 5:

Ejemplo de gráfica obtenida del procesamiento de datos meteorológicos en el software Climdex



Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

Capítulo Tercero

1. Presentación y Análisis de Resultados

Los resultados obtenidos del proceso de tratamiento estadístico mediante Climdex de los datos de las estaciones antes mencionadas se muestran en la presente tabla y en las siguientes gráficas, la tabla 9 a continuación muestra los índices analizados (primera columna) las unidades en las que estas se deben leer (columnas dos y tres) y las estadísticas de cada estación (columnas posteriores).

Debido a la variabilidad de los índices climáticos, es difícil decir que estos índices sigan una tendencia lineal creciente o decreciente, es por eso que conjuntamente con cada índice se presentan las estadísticas: R^2 , significancia estadística y pendiente de la tendencia, de cada índice.

La pendiente de la tendencia indicará si el índice crece (positivo) o decrece (negativo) y la velocidad con el que se da este cambio. r^2 O el coeficiente de determinación, es una medida entre 0 y 1 de qué también los puntos siguen determinado modelo, en estos casos, r^2 tiene valores bajos ya que el comportamiento de los datos no es lineal. Finalmente, la significancia estadística, o valor-P es la herramienta más útil en este tipo de análisis ya que nos indica que – a pesar de las variaciones de los datos- éstos presentan un comportamiento cercano a la tendencia lineal. Mientras más pequeña sea la significancia estadística, los datos siguen más la tendencia determinada y se alejan de un comportamiento aleatorio.

Cabe indicar que esta es la metodología recomendada por el IPCC para determinar y caracterizar cambio climático por causas antrópicas, en el que los índices de temperatura y precipitación presentan comportamiento general a crecer o decrecer desde la época industrial, a pesar de las causas naturales que puedan provocar variabilidad como la estacionalidad o la presencia de oscilaciones como la Del Niño, La Niña, PDO, etc.

Con respecto a los índices seleccionados que se ajustan a la zona de estudio propuesta para este trabajo, consecuentemente se presentan graficas estadísticas generadas en Climdex de los mismos datos con su respectivo análisis y posteriormente sus comentarios, los mismos que serán mencionados en el siguiente capítulo.

Tabla 8:

Cuadro de estadística e índices climáticos por estación del DMQ.

Índice	Unidad	Estadística	Estación					
			Carapungo	Chillos	Iñaquito	Izobamba	Tola	Tumbaco
La Máxima Temperatura de Cada Mes (TXx)	°C/mes	r2	0,238	0,417	0,094	0,054	0,000	0,299
		Significancia	450522,222	0,000	131000,000	0,106	0,976	33,400
		Pendiente	-1,000	1,000	-0,200	0,003	0,326	0,200
Temperatura Máxima Diaria Sobre el Percentil 90th (Tx90p)	% /mes	r2	0,286	0,259	0,159	0,082	0,000	0,219
		Significancia	133932,986	0,001	128,000	0,017	0,886	73,700
		Pendiente	-0,013	0,020	0,004	0,020	0,000	0,015
Temperatura Mínima Más Alta en Cada Mes (TNx)	°C	r2	0,107	0,651	0,137	0,004	0,017	0,453
		Significancia	144982,756	0,000	12,300	0,083	0,010	0,000
		Pendiente	-0,092	0,089	0,026	0,001	0,000	0,085
Temperatura Mínima Diaria Sobre el Percentil 90th (Tn90p)	%	r2	0,031	0,422	0,182	0,017	0,008	0,435
		Significancia	395575,198	0,000	0,000	0,017	0,000	0,000
		Pendiente	0,006	0,027	0,003	0,004	-0,001	0,017
Número de Días Con Una Precipitación mayor/igual a 20mm (r20mm)	Días	r2	0,387	0,321	0,000	0,036	0,016	0,512
		Significancia	0,005	0,041	0,915	0,220	0,687	0,006
		Pendiente	0,031	0,135	0,034	0,115	-0,007	0,138
Número de Días Secos Consecutivos Registrados (CDD)	Días	r2	0,027	0,037	0,001	0,014	0,032	0,093
		Significancia	0,661	0,784	0,853	0,625	0,227	0,913
		Pendiente	0,375	0,750	0,000	0,122	0,000	0,667
Días Muy Húmedos Registrados (R95pTot)	mm	r2	0,305	0,489	0,129	0,003	0,044	0,512
		Significancia	0,016	0,012	0,170	0,955	0,277	0,009
		Pendiente	94916,000	23,950	3,200	0,209	-1412,000	177083,000
Días Extremadamente Húmedos (R99pTot)	mm	r2	0,008	0,222	0,037	0,006	0,021	0,555
		Significancia	0,769	0,217	0,469	0,547	0,254	0,003
		Pendiente	0,000	550909,000	0,256	0,266	-0,239	9,810
Rango Diurno de Temp. Máx. Menos Temp. Min Mensual (DTR)	°C	r2	0,345	0,052	0,008	0,009	0,002	0,038
		Significancia	0,929	0,011	0,186	0,070	0,338	0,026
		Pendiente	-0,016	-0,005	-0,001	0,002	0,001	-0,006

Fuente: El Autor.

Elaboración: El Autor

1.1 Índice TXx

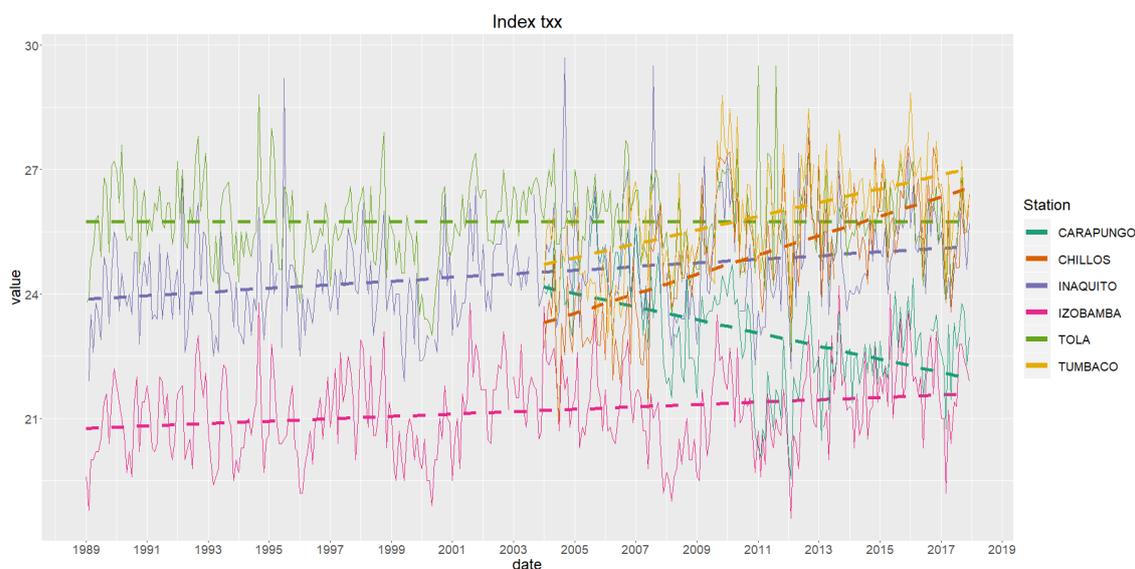
El índice TXx muestra las temperaturas máximas registradas al mes, la gráfica muestra que en la mayoría de las estaciones presentan líneas de pendiente con tendencia positiva, (excepto para el caso de Carapungo). Al igual que en el caso de las temperaturas mínimas, se puede verificar que las temperaturas máximas son muy diferentes en función de la localidad donde se encuentran las estaciones, para el caso de Izobamba se presentan las temperaturas más bajas debido a que estos datos han sido tomados en la zona sur del

Distrito Metropolitano de Quito, la cual se sabe que es una zona característicamente fría, por otro lado en estaciones como La Tola se presentan temperaturas que sobrepasan los 24°, de igual manera en Iñaquito se registran temperaturas sobre los 27°, además es necesario recalcar que se tienen picos de temperaturas que representan días en un mes que sobrepasan los 29°, estas se consideran como temperaturas récord o eventos extremos, que son realmente inusuales.

En cuanto a las estaciones que tienen series cortas de datos se diferencia que los lugares más calientes son los que alojan a las estaciones Chillos y Tumbaco ya que muestran una tendencia al incremento de temperatura muy acelerado, fenómeno que es preocupante ya que además los datos muestran líneas de tendencia significativas con pendientes de 0,02 para la estación Chillos y 0,01 para la estación Tumbaco, que si bien muestran líneas de tendencia al incremento, con una significancia superior al 95% , por otro lado cabe destacar que la pendiente de Carapungo tiene un comportamiento de pendiente negativa.

Ilustración 6:

Temperaturas máximas extremas.



Fuente: El Autor.

Elaboración: El Autor

Cabe mencionar que la significancia estadística de cada pendiente con la que se ha trabajado está explicada en la tabla 8 “Cuadro de estadística e índices climáticos por estación del DMQ”.

1.2 Índice Tx90p

La gráfica del índice Tx90p muestra el porcentaje de días al mes en los cuales la temperatura máxima supera el percentil 90, y que generalmente se refiere a las temperaturas que se experimentan en las horas del mediodía. Se destaca que, en la mayoría de estaciones (con excepción de Carapungo, que posiblemente contiene datos erróneos al inicio de la serie) se tienen pendientes con una línea de tendencia positiva, esto indica la presencia de un aumento en el porcentaje de temperaturas máximas registradas en las zonas donde se encuentran las estaciones, sin embargo, en ninguna de estas series se tiene significancia estadística, por lo que no se podría asegurar el incremento con una seguridad al 95%.

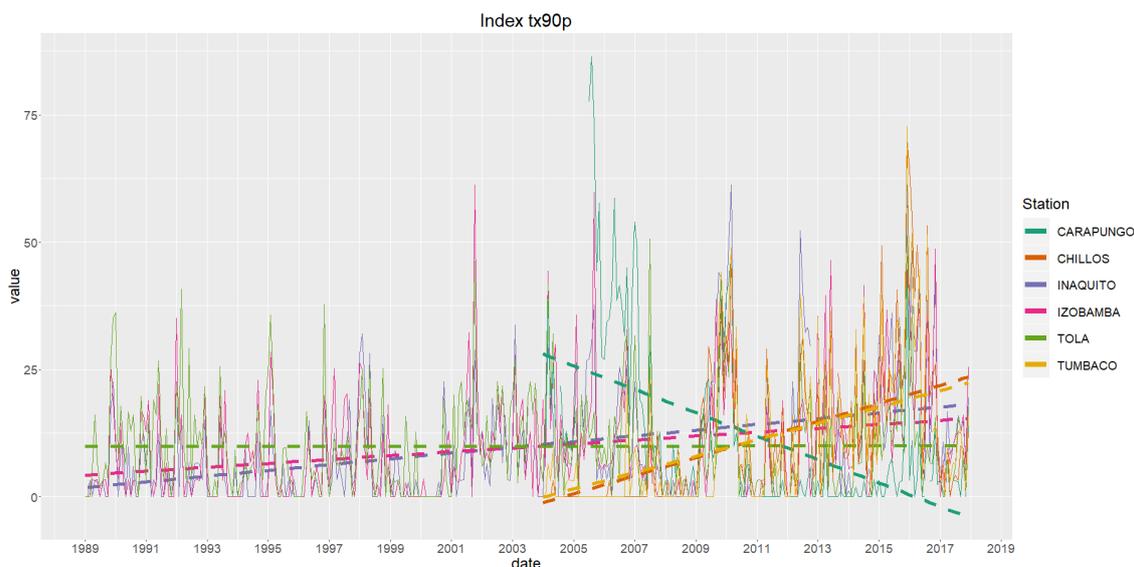
Por otro lado, de los datos arrojados correspondientes a las series largas de tiempo, se destaca La Tola que posee un valor de pendiente con una tendencia positiva, siguiendo a esta se destaca Izobamba y por último Iñaquito, al igual que en los casos anteriores se muestra que las pendientes son mucho más pronunciadas para los datos de serie corta como lo son Chilllos y Tumbaco y esto por lo tanto es un indicador de evidencia de calentamiento.

Por último, se observa que en los datos de la estación Izobamba se observan varios picos que denotan récords de temperatura, los mismos que se aproximan al percentil 50, es decir que más de la mitad de los datos de temperaturas máximas superan dicho percentil y estos corresponde a registros de años excepcionalmente cálidos. Sin embargo, aunque las pendientes son positivas en todos los casos, no son estadísticamente significativas por los altos valores p.

Finalmente, es evidente que, a partir del año 2001, el porcentaje de días con temperaturas altas se ha incrementado en todas las estaciones.

Ilustración 7:

Temperatura máxima registrada.



Fuente: El Autor.

Elaboración: El Autor.

1.3 Índice TNx

El indicador TNx (que muestra el valor máximo mensual de las temperaturas mínimas registradas en un día), se muestra en la gráfica con una línea de tendencia en prácticamente neutra para el caso de la estación La Tola e Izobamba, y aunque el resto de tendencias están en aumento, las únicas series estadísticamente significativas son aquellas del sector valle norte de Tumbaco.

Se muestra el comportamiento típico de temperaturas en Quito, los valores más fríos corresponden a la estación de Izobamba al sur de Quito, y se mantienen con un promedio bajo los 10°C. Mientras tanto, en las estaciones como Iñaquito y La Tola (Valle) muestran temperaturas mínimas sobre los 10°, por ejemplo, para el caso de Izobamba. En Tumbaco y los Chilllos, se encuentran los valores más grandes de temperaturas mínimas superando los 15 °C.

Ilustración 8:

Máximo de temperaturas mínimas registradas.



Fuente: El Autor.

Elaboración: El Autor

1.4 Índice Tn90p

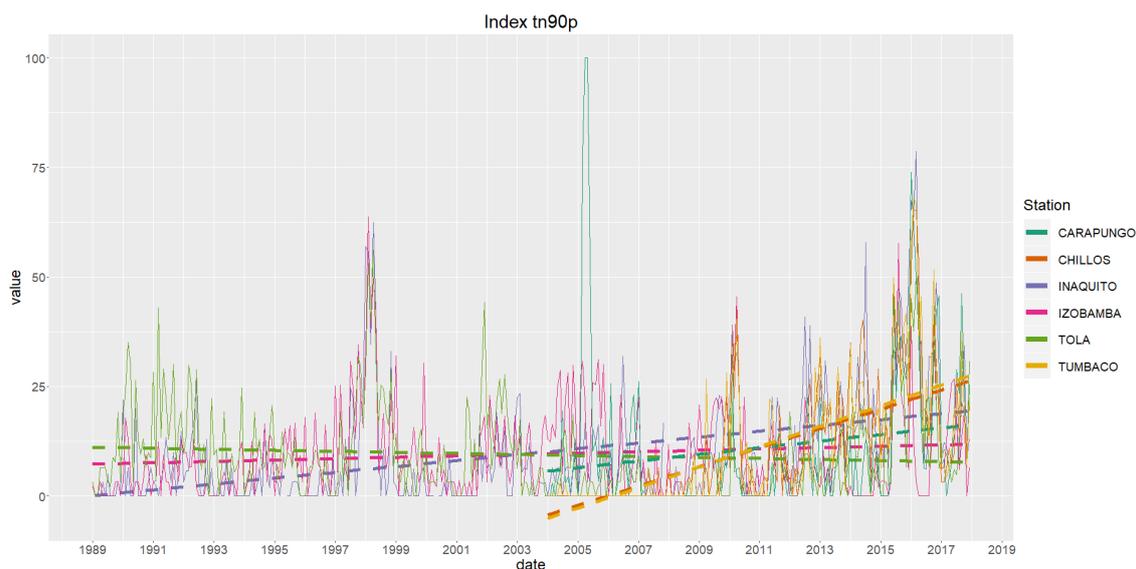
Tn90p es un indicador que muestra el porcentaje de días al mes en los que las temperaturas mínimas superan el percentil 90 para, cabe recalcar que estas son temperaturas que ocurren a primeras horas de la mañana y su importancia radica en que brindan un descanso al estrés térmico que sufren las plantas producto de la temperatura cálida a la que se exponen durante todo el día, sin embargo se debe aclarar que cuando se incrementan las temperaturas mínimas las plantas no logran liberarse del estrés térmico de la forma en que deberían. Así mismo, estas temperaturas bajas evitan la proliferación de vectores como mosquitos transmisores de enfermedades tropicales, pero de igual forma si estas se incrementan da paso a que dichos vectores generen tolerancia o en su defecto dan la pauta para la aparición de nuevos vectores que afecten al Distrito Metropolitano.

También de acuerdo a los datos generados por Climdex se observa que la significancia estadística es alta (todos los valores p son bastante bajos) que indica que con una seguridad superior al 95% se registran más días con temperaturas mínimas elevadas y con una línea de tendencia positiva (incremento), con excepción de Carapungo que por lo analizado presenta errores en la toma de datos de temperatura, sobre todo en el período inicial de los datos en los que se registran valores excepcionalmente altos. Observando la forma que presentan las mencionadas líneas de tendencia se ratifica que existe un incremento significativo de las temperaturas mínimas en todo el. Un incremento de temperaturas mínimas es indicativo certero de cambio climático producto de la concentración de gases de efecto invernadero local y regional por una parte y también el efecto ICU por otra ya que se conoce que el asfalto de la zona urbana suele liberar durante la noche el calor que absorbe a lo largo de todo el día, por lo que un característico de este efecto es que las temperaturas mínimas se incrementen en las zonas urbanizadas.

Además, la gráfica muestra que desde el año 1998 existe evidencia de un incremento significativo de temperaturas mínimas para todas las estaciones en el que se evidencia que más del 50% de los datos superan el percentil 90, después, ya pasando el año 2009 los datos ratifican que las estaciones tienen una tendencia a superar el rango del percentil 50, esta tendencia se justifica con el comportamiento de los datos de las estaciones cerca del año 2015 donde los registros de datos muestran un récord de incremento de temperaturas mínimas en básicamente el 75% de los datos.

Ilustración 9:

Temperaturas mínimas diarias que superan el percentil 90.



Fuente: El Autor.

Elaboración: El Autor

1.5 R20mm

El indicador R20mm muestra la frecuencia de eventos extremos, ya que cuenta el número de días al año de eventos de lluvia que han superado los 20mm que es considerada intensa, en todos los casos de las estaciones muestran una línea de tendencia positiva para las pendientes. Las estaciones tendencia con una significancia estadística superior al 96% son las de Tumbaco, Chillos y Carapungo, es decir aquellas ubicadas en las periferias de Quito.

La gráfica también muestra que se tiene una serie de datos con comportamientos muy oscilantes, por ejemplo, existen años donde los datos marcan evidencia de que hay muchos días que superan los 20mm y así mismo se muestra que hay otros años donde hay pocos días que superan este número. Este comportamiento oscilante puede deberse a influencias externas debido a variabilidad climática como el fenómeno del Niño, Oscilaciones como la PDO u otros cuya investigación se recomienda con más detalle.

Ilustración 10:

Cantidad diaria de precipitación mayor a 20 mm.



Fuente: El Autor.

Elaboración: El Autor

1.6 Índice CDD

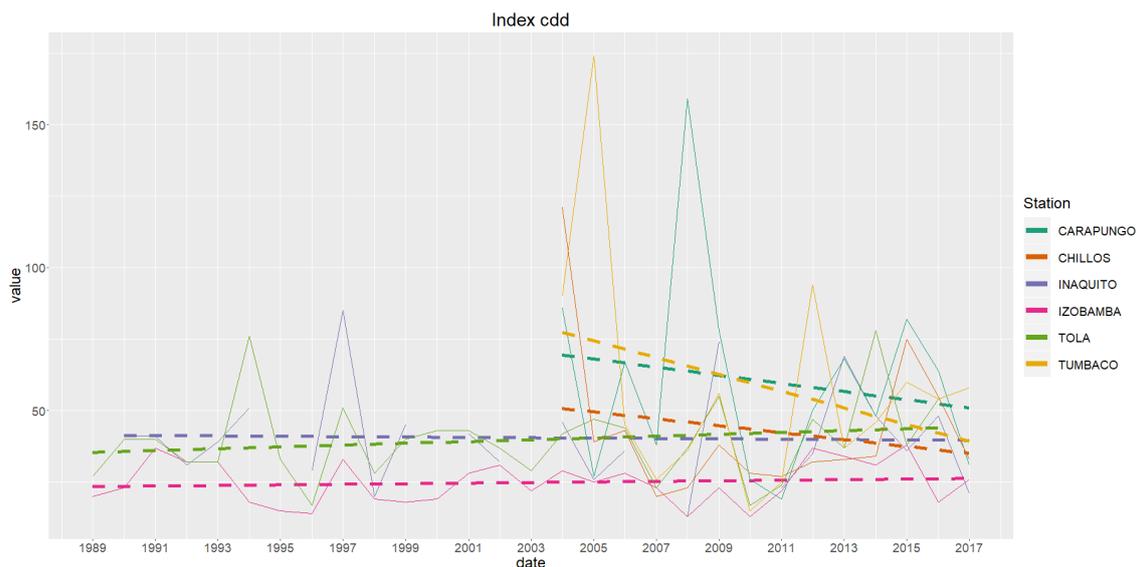
En la siguiente gráfica se representan los datos del indicador del mayor número de los días secos consecutivos al año para cada estación (CDD), este indicador es importante en el estudio de sequías o incendios. En las tres estaciones que tienen un rango temporal de 22 años que corresponden a Izobamba, La Tola, e Iñaquito, de estas tres se aprecia una línea de tendencia hacia el incremento pero que no es muy marcada y tampoco se tienen datos de significancia estadística considerable, sin embargo por otro lado la gráfica muestra que existen líneas de tendencia estadística de pendiente negativa para las estaciones con rango de datos temporales menores a las mencionadas, lo que apunta a un comportamiento que puede ser más bien cíclico.

Así mismo, los picos muestran que existe una temporada donde se registra datos de sequía y corresponden al año de 1997 estos datos se muestran en tres estaciones, Izobamba, Carapungo e Iñaquito.

Las estaciones con rango temporal menor registran picos elevados que indican que en el años 2004 a 2006 se presenta una temporada con mayor número de días secos consecutivos para las zonas de estaciones de Chillos y Tumbaco, de manera similar en la zona donde está ubicada la estación Carapungo se registran mayor número de días secos consecutivos referentes al año 2008, se debe destacar que los datos de todas las estaciones con excepción de Izobamba muestran un aumento de número de días secos consecutivos entre los años 2011 y 2017.

Ilustración 11:

Días secos consecutivos.



Fuente: El Autor.

Elaboración: El Autor

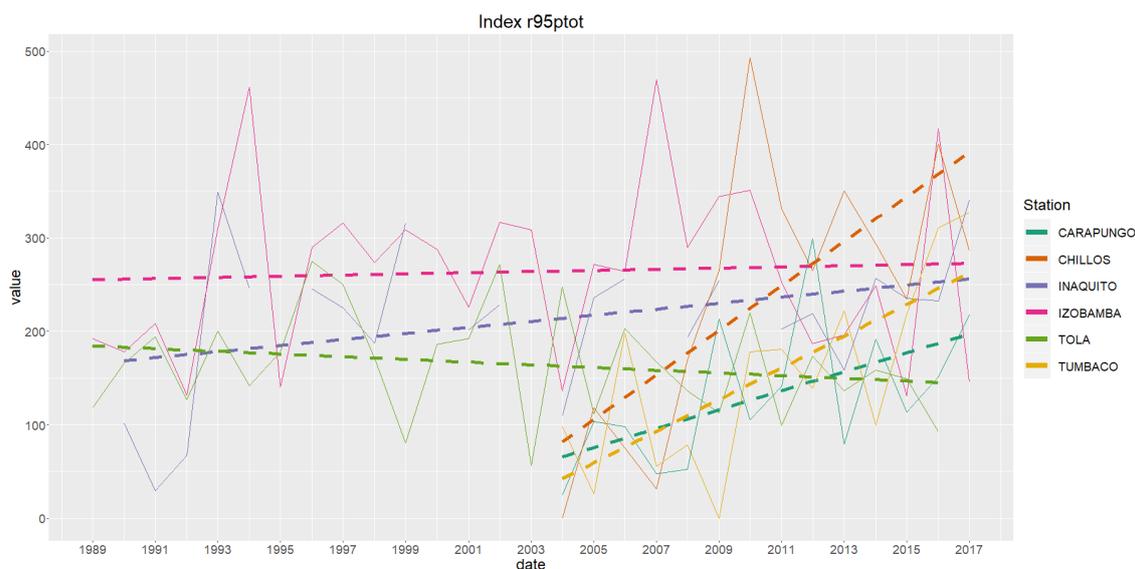
1.7 Índice R95p

R95p es un indicador que refiere la cantidad diaria de precipitación presente en un día lluvioso cuando éste supera el percentil 95th y acumulado durante todo un año, es decir, este índice acumula los datos de los días que se registran como muy lluviosos en el Distrito Metropolitano de Quito dentro de un año y que han sobrepasado el percentil 95, mientras más grande es este indicador se evidencia que se tienen días con lluvia más intensa, en la mayoría de las estaciones analizadas se manifiestan pendientes con líneas de tendencia positivas excepto para la estación La Tola la cual muestra una pendiente con línea de tendencia ligeramente negativa pero sin significancia estadística.

Lo opuesto ocurre en estaciones como Carapungo, Chillos y Tumbaco donde se evidencia que la cantidad de precipitación en los eventos grandes está en aumento. Este es un claro indicador de cambio climático ampliamente registrado en la literatura, y que apunta a la severidad en aumento de las lluvias extremas.

Ilustración 12:

Días muy lluviosos.



Fuente: El Autor.

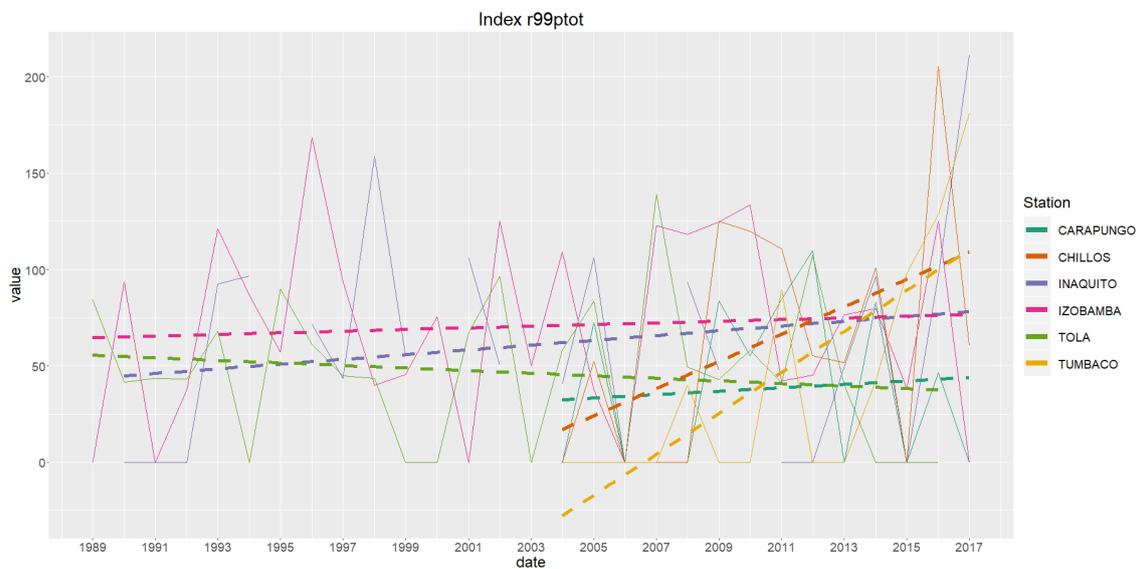
Elaboración: El Autor.

1.8 Índice R99p

R99p es un indicador de la cantidad de precipitación que presenta un día extremadamente lluvioso y que se encuentran sobre el percentil 99, es decir es el registro de los eventos de lluvia extrema acumulados durante el año. Es un indicador muy parecido al anterior pero que se limita al estudio de uno de cada 100 eventos, el más grande registrado al año. En la gráfica se muestran líneas de tendencia positiva con excepción de los datos obtenidos de la estación La Tola que muestra una línea de tendencia ligeramente negativa pero sin significancia, sin embargo se debe considerar que la única estación con una estadística significativa es la de Tumbaco, esto quiere decir que la intensidad de los eventos extremos de lluvia en la zona de la estación cada vez tendrán valores de índice de lluvia intensa más grandes, en otras palabras los días extremadamente lluviosos en Tumbaco cada vez más incrementaran su intensidad.

Ilustración 13:

Días extremadamente lluviosos.



Fuente: El Autor.

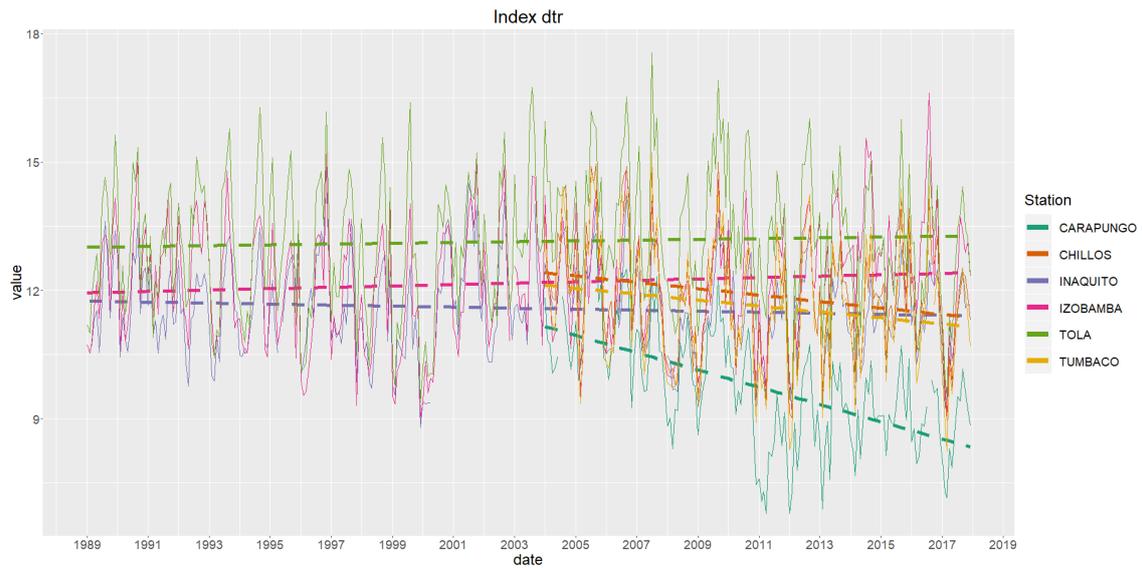
Elaboración: El Autor

1.9 DTR

El índice DTR se refiere al rango diario de temperatura, expresa la diferencia de que existe entre los valores más grandes de la diferencia entre máximos y mínimos de temperatura registrados durante un mes, en la gráfica se muestra que para cuatro de las estaciones analizadas se evidencian líneas de pendiente con tendencia al decremento, excepto para las estaciones de Izobamba y Tola que tienen pendientes positivas aunque pequeñas y estadísticamente no significativas, los datos de las cuatro estaciones con línea de tendencia negativa mencionadas indican que el indicador de DTR tiende a disminuir, muy probablemente debido al incremento de las temperaturas mínimas como lo mencionan otros autores de trabajos similares; sobre todo en las estaciones del valle: Los Chillos y Tumbaco, en los cuales se tiene una significancia superior al 95% de confianza. Como se había mencionado, es muy probable que este comportamiento se pueda atribuir al incremento mayor de las temperaturas mínimas debidas a la conjunción de los efectos del calentamiento global y/o ICU.

Ilustración 14:

Rangos diarios de temperatura.



Fuente: El Autor.

Elaboración: El Autor

Conclusiones y Recomendaciones

1. Conclusiones

Con los resultados encontrados podemos responder la pregunta central de esta investigación, ¿existe evidencia de Cambio Climático en Quito? ¿Y si éste cambio se ha mantenido, disminuido o aumentado respecto a estudios anteriores? Los resultados muestran de una manera estadísticamente robusta que se evidencia un incremento marcado en lo que se refiere a valores extremos de temperaturas máximas, mínimas y precipitación. Evidencia que concuerda con los efectos reportados de cambio climático (IPCC, 2014). Cada una de las variables serán discutidas por separado a continuación.

Comportamiento de las temperaturas máximas.

Como se puede apreciar en las figuras 5,6,10, se registra un incremento sustancial de las temperaturas máximas en Quito, es decir aquellas que se registran al medio día. Sin embargo, aquella estación en la que el aumento es indudable, con una seguridad al 95% es la serie correspondiente al Valle de los Chillos, seguido del valle de Tumbaco.

Dicho aumento de las temperaturas máximas en los valles del Distrito Metropolitano de Quito concuerda con los resultados del estudio de Serrano et al., sin embargo, en este trabajo se aprecia que el crecimiento de las temperaturas máximas presenta cierta aceleración a lo largo de los últimos años comparado con la línea de tiempo estudiada por la autora. Además, Serrano et al., sugieren que la posible causa radique en ausencia acelerada de vegetación en algunas zonas, lo que impide que escape el calor a través de la evapotranspiración de las plantas (Serrano, Zuleta, & Moscoso, Análisis estadístico de datos meteorológicos mensuales y diarios para la determinación de variabilidad climática y cambio climático en el Distrito Metropolitano de Quito., 2012).

El incremento de temperaturas máximas al medio día puede presentar afectaciones sobre la salud de los ciudadanos en las zonas donde se registran los índices más altos de este incremento, en especial los mayormente perjudicados sería aquellos que trabajan al

aire libre, en invernaderos o lugares similares en donde el calor de medio día muestre dificultad para su dispersión. Por otro lado, en zonas del Distrito Metropolitano de Quito donde se alojen cultivos y animales de campo este incremento de temperatura correspondiente a la variabilidad climática podría causar que dichos animales y cultivos sufran un “estrés térmico” al cual no están acostumbrados.

Temperaturas Mínimas

Esta variables es la que presenta más certeza estadística de acuerdo al análisis, con valores por sobre el 90% de seguridad. Prácticamente en todas las estaciones el número de días con temperaturas mínimas altas se encuentra en aumento. Asimismo, estas temperaturas muestran un incremento en la zona del Valle norte de Tumbaco. Además, nuevamente se aprecia un calentamiento en la zona periférica de la ciudad de Quito, tal como se ha reportado en los estudios de Serrano (Serrano, Zuleta, & Moscoso, Análisis estadístico de datos meteorológicos mensuales y diarios para la determinación de variabilidad climática y cambio climático en el Distrito Metropolitano de Quito., 2012) que analizan este comportamiento en el período de tiempo 1963-2011.

Cabe indicar que los incrementos de temperaturas mínimas son un efecto esperado de dos causas: el cambio climático global y el efecto ICU, en el caso de los Valles de Quito ha marcado la diferencia en los comportamientos de las series de tiempo debido tanto a su geografía como al aumento de la mancha urbana.

Por último, es importante recalcar que un incremento en las temperaturas mínimas, afectaría principalmente a las especies endémicas, las cuales necesitan de las bajas temperaturas a las cuales se han adaptado en años, y que puede causar su migración hacia zonas más frías. Consecuentemente, especies de distintos pisos climáticos podrían adaptarse a las zonas más cálidas de Quito pudiendo en algunos casos ser vectores de enfermedades infecciosas como el dengue, paludismo, zika o chikunguña, coincidiendo su desarrollo en algún momento con clima de Quito (Serrano S., 2016).

Precipitación

La precipitación es una de las variables más difíciles de estudiar y predecir (Serrano S. ,, 2012), sin embargo, al analizar el comportamiento de los valores sobre los

percentiles 95 y 99 de lluvia, se puede verificar un incremento tanto en intensidad, como en frecuencia. Por lo tanto, no quiere decir que en Quito esté lloviendo más, sino que, cuando llueve, la probabilidad de que ese evento tenga grandes magnitudes aumente.

Sobre todo, en el caso de Tumbaco, los Chillos y Carapungo en donde esta afirmación tiene un 95% de confianza, nuevamente se puede mencionar que la creciente urbanización de la zona está haciéndola mucho más vulnerable a los efectos del cambio climático ya que estaría generando islas de calor urbana que contribuyan con esta variabilidad climática.

Los efectos de las lluvias torrenciales se sienten sobre todo en la infraestructura, cultivos, deslaves, inundaciones que muchas veces causan pérdidas cuantiosas e inclusive vidas humanas, sintiéndose principalmente en las zonas de los valles del Distrito Metropolitano de Quito mencionadas anteriormente.

2. Análisis Comparativo

El siguiente análisis comparativo se realiza entre los resultados del análisis estadístico de precipitación y temperatura de la línea de tiempo estudiada en el artículo de Serrano (Serrano, 2012) y el presente trabajo, este ha podido lograrse tomando en consideración los indicadores calculados en la estación Izobamba ya que fueron los datos con los que se ha podido realizar comparaciones.

Se ha elaborado la siguiente tabla (9), misma que indica los valores de pendiente de la estación Izobamba obtenidos tanto en el trabajo de Serrano et. al. como en el presente.

Tabla 9:

Tabla comparativa para los índices de la estación Izobamba

Índice	Unidad	Estadística	Izobamba		
			Pendientes Hasta el 2012	Pendientes Hasta 2019	Cambio
La Máxima Temperatura de Cada Mes (TXx)	°C/mes	Significancia	0,200	0,106	
		Pendiente	0,010	0,003	Disminuye
Temperatura Máxima Diaria Sobre el Percentil 90th (Tx90p)	% /mes	Significancia	0,540	0,017	
		Pendiente	0,205	0,020	Disminuye
Temperatura Mínima Más Alta en Cada Mes (TNx)	°C	Significancia	0,000	0,083	
		Pendiente	0,030	0,001	Disminuye
Temperatura Mínima Diaria Sobre el Percentil 90th (Tn90p)	%	Significancia	0,000	0,017	
		Pendiente	0,683	0,004	Disminuye
Número de Días Con Una Precipitación mayor/igual a 20mm (r20mm)	Días	Significancia	0,005	0,220	
		Pendiente	-0,127	0,115	Aumenta
Número de Días Secos Consecutivos Registrados (CDD)	Días	Significancia	0,330	0,625	
		Pendiente	0,076	0,122	Aumenta
Días Muy Húmedos Registrados (R95pTot)	mm	Significancia	0,000	0,955	
		Pendiente	3,650	0,209	Disminuye
Días Extremadamente Húmedos (R99pTot)	mm	Significancia	0,002	0,547	
		Pendiente	1,896	0,266	Disminuye
Rango Diurno de Temp. Máx. Menos Temp. Min Mensual (DTR)	°C	Significancia	0,003	0,070	
		Pendiente	-0,021	0,002	Aumenta

Fuente: El Autor.

Elaboración: El Autor

En primer lugar, se observa que todos los índices de cambio climático de temperatura TXx, TNx, Tx90p, Tn90p están disminuyendo lo cual quiere decir que estos indicadores de cambio climático están apaciguando, dicho en otras palabras, se sigue registrando un aumento, sin embargo, este no se muestra tan drástico como en años anteriores.

Con respecto a los índices relacionados con las precipitaciones, vemos que el indicador R20mm está aumentando lo cual quiere decir de que los eventos de lluvia extremos, es decir los eventos de lluvia sobre los 20 mm están incrementando, por otro lado, el índice R95p y R99p aparentemente están disminuyendo lo cual quiere decir que los eventos extremos de lluvia muestran una tendencia decreciente en intensidad, sin embargo, de todas maneras se observan pendientes positivas, es decir que se sigue

registrando un incremento generalizado de la lluvia aunque con menos agresividad que en años anteriores.

En cuanto al número de días secos consecutivos CDD se observa un incremento, esto quiere decir que la lluvia muestra una tendencia hacia la polarización en el sentido de que cada vez hay más días secos consecutivos en la zona de estudio y esto se traduce en que cuando llueve puede llover de una forma agresiva, es decir no hay una temporada de lluvia constante si no que se divide entre un clima o muy seco o un clima muy húmedo.

Por último, el índice DTR aumenta en cuanto a su pendiente, lo cual indica que los rangos entre las temperaturas mínimas y máximas están aumentando, esto significa que en un día existen varios cambios de temperatura considerables, lo cual no es bueno para los ecosistemas y por supuesto para los sectores de la agricultura y salud ya que pueden causar un desequilibrio importante, estos cambios considerables en cuanto a la temperatura se presentan como un indicador de cambio climático con una tendencia al incremento.

3. Recomendaciones: Cambio Climático e Isla de Calor Urbana

En este tipo de estudios en donde se estudian temperaturas y precipitación sobre el área urbana, es difícil identificar exclusivamente si los efectos registrados corresponden al Cambio Climático o al efecto ICU. Y es que ambos fenómenos se caracterizan por un incremento generalizado de temperaturas máximas y mínimas. En lo que se refiere a la precipitación, sí existe diferencia, ya que el Cambio Climático se evidencia con una polarización de la lluvia, que se caracteriza por un incremento de los eventos extremos tanto en frecuencia, como en intensidad (IPCC, 2013). Mientras, que el efecto ICU, sobre la precipitación no está totalmente definido y sólo se ha indicado la presencia de microclimas sobre la zona urbana.

En la presente investigación existe un evidente incremento de temperaturas máximas y mínimas, así como un incremento de eventos extremos, por lo que se concluye que el cambio climático es una realidad en el Distrito Metropolitano (MDMQ, 2014).

Sin embargo, el incremento de temperaturas no sólo se deberá a los efectos del cambio climático sino también a la creciente urbanización y a la presencia de materiales

de construcción como concreto y asfalto; es decir, al efecto ICU. Pero no es posible definir qué porcentaje de los cambios se refiere a qué causa, ya que sería necesario realizar otro tipo de investigación en donde se comparen –por ejemplo- regiones urbanizadas con las no urbanizadas (Romero & Sarricolea, 2016).

Inclusive las acciones para mitigar Cambio Climático y Efecto ICU son parecidos. Por ejemplo, la reforestación, es una acción eficiente para absorber carbono y evitar su liberación a la atmósfera. Y la reforestación urbana disminuye la presencia de zonas asfaltadas, da sombra y favorece la evapotranspiración. Por lo que también en este campo de la mitigación es difícil saber qué acciones mitigan de mejor manera Cambio Climático o Isla de Calor.

Existe variación en la temperatura en el área de estudio debido a la ausencia o disminución de áreas verdes, por lo tanto se recomienda tomar en cuenta los proyectos de reforestación, corredores ecológicos que permitan el sombreado por árboles y por qué no los proyectos de huertos urbanos, además de considerar utilizar materiales que sean capaces de combatir el efecto ICU para de esta forma crear un conjunto de soluciones y así evitar las consecuencias de esta variación con una tendencia positiva al incremento de la temperatura.

Así, dentro del área de estudio propuesta se evidencia un particular tipo de incremento en la temperatura de los valles, por lo tanto dicha variabilidad climática en esos sectores de la zona de estudio está ligada a la precipitación y consecuentemente a la aparición de eventos extremos particularmente con tendencia al incremento, para esto se recomienda a las administraciones zonales crear campañas para la recuperación y aumento de vegetación, de esta manera se logra que no se caliente la temperatura del aire y por el contrario se potenciara el proceso de evapotranspiración, una estrategia en espacios públicos sería la correspondiente a la biomasa, por otro lado en el sector de la construcción la recomendación es utilizar materiales que no sean muy claros con el fin de evitar una total reflectancia y tampoco muy oscuros para que no contribuyan a la absorbancia.

Como se ha manifestado, el cambio climático mundial afecta al Distrito Metropolitano de Quito generando precipitaciones cada vez más fuertes en los valles, por

lo tanto se recomienda tanto para la ciudad como para los valles el uso de materiales que combinen la dureza y porosidad a fin de soportar los fuertes eventos climáticos, por otro lado incrementar la superficie permeable vegetal con el fin de evitar por un lado posibles deslaves y por otro el riego por inundación además del colapso en las redes de alcantarillado debido a la escorrentía producto de las fuertes lluvias.

Por último, debido a la situación geográfica del Distrito metropolitano de Quito sumado a los efectos del Calentamiento Global mundial y la variabilidad climática cambiante vemos que la zona de estudio está expuesta a altos valores de radiación UV por lo que la fauna y flora se ven amenazadas ante esto, para solventar este inconveniente se recomienda la utilización de arbolado viario con la finalidad de brindar sombra para los humanos y animales que viven en el Distrito Metropolitano, además de actuar como sumideros de carbono (aunque sea en poco porcentaje) y una barrera contra los efectos de los vientos fuertes.

En lo que se refiere a los cálculos, se recomienda que los resultados analizados en su mayoría fueron considerados para el análisis en Climdex usando valores NA contrariamente a lo que sugiere el manual que es utilizar valores de -99,9, se sugiere para futuros trabajos considerar el tratamiento de datos utilizado en este trabajo o a su vez disponer del manual de usuario actualizado de Climdex con el fin de evitar posibles errores en los análisis estadísticos.

Bibliografía

- Alfredo Núñez, J. D. (2010). *ANÁLISIS ESTADÍSTICO CON FCLIMDEX PARA ECUADOR*. Obtenido de http://web.ambiente.gob.ec/sites/default/files/users/dhermida/Informe_Final_ClimDex.pdf.
- Alicia Bárcena, J. S. (2018). *LA ECONOMÍA DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE: UNA VISIÓN GRÁFICA*. Obtenido de Comisión Económica para América Latina y el Caribe CEPAL.
- Bastidas Guevara, W. (2016). *Guía Climática Agroecoturística para el cantón Quito-Provincia de Pichincha 2014*. Quito.
- Bula, A. J. (2009). Calentamiento Global: Verdades y Especulaciones. *Dimens. Empres.* Vol. 7 No. 2, 33-39.
- CEPAL. (2017). *Comisión Económica para América Latina y el Caribe*. Recuperado el julio de 2019, de https://www.cepal.org/ilpes/noticias/paginas/8/40548/ALyC_y_CC_CursoAlatorre.pdf
- CEPAL-Naciones Unidas. (2019). Recuperado el 13 de junio de 2019, de Comisión Económica para América Latina y el Caribe.
- CIIFEN. (2017). *Centro Internacional para la Investigación del Fenómeno de El Niño*. Recuperado el Agosto de 2019, de http://www.ciifen.org/index.php?option=com_content&view=article&id=573:variabilidad-climatica-y-extremos&catid=98&Itemid=131&lang=es
- Climate Research Branch Environment. (20 de 09 de 2004). R Climdex Manual del Usuario. Ontario, Canada.
- Climdex. (Enero de 2020). *Climdex. Org*. Obtenido de <https://www.climdex.org/learn/>

- CMNUCC. (2018). *Informes de las sesiones, Documento de sesión COP 24*. Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, Katowice. Obtenido de informes de las sesiones Documento de sesión COP 24.
- Corporación Universitaria de Investigación Atmosférica . (02 de 2020). *MetEd*. Obtenido de https://www.meted.ucar.edu/training_module.php?id=546#.XmLiLahKg2w
- Díaz Cordero, G. (2012). El Cambio Climático. *Ciencia y Sociedad*, 227-240.
- Feo, O. (2009). Cambio Climático y Salud en la Región Andina. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*.
- Francou, B. R. (2013). *Glaciares de los Andes Tropicales víctimas del Cambio Climático*. ISBN.
- Guarderas, P., Coello, M., & Silva, X. (2016). El efecto de los árboles urbanos del parque El Ejido en la regulación del microclima de Quito: interacción entre medio ambiente, salud y bienestar. *Rev Fac Cien Med*, 81-90.
- Hidalgo, M. (2017). Variabilidad Climática Interanual sobre el Distrito Metropolitano de Quito asociada a ENOS. *CienciAmerica*.
- Hofstede, R. (2014). Los Páramos Andinos ¿Qué sabemos? Estado de conocimiento sobre el impacto del cambio climático en el ecosistema páramo.
- Honty, G. (marzo de 2007). América Latina Frente al Cambio Climático. *Observatorio de Globalización*.
- INAMHI. (2015). *Red de estaciones automáticas hidrometeorológicas*. Quito.
- INEC. (2010). *FASCÍCULO PROVINCIAL PICHINCHA*. Recuperado el 12 de 08 de 2019, de Instituto Nacional de Estadística y Censo: <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/wp-content/descargas/Manual-lateral/Resultados-provinciales/pichincha.pdf>
- Instituto de La Ciudad. (2013). *Sistemas-Urbanos en el DMQ. Quito: Instituto de La Ciudad*. Quito, Ecuador.

- Instituto Metropolitano de Planificación Urbana. (04 de 2019). Quito 2040: La Visión de Los Ciudadanos. Quito, Pichincha, Ecuador.
- Instituto Nacional de Estadística y Censos INEC. (06 de 2019). *www.inec.gob.ec*. Obtenido de Población y Demografía: https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Poblacion_y_Demografia/Proyecciones_Poblacionales/presentacion.pdf
- IPCC. (2013). Recuperado el 05 de 2019, de Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático: <https://www.ipcc.ch/>
- IPCC. (2014). *Cambio Climático 2014: Informe de Síntesis*. Ginebra: IPCC.
- MAE. (2011). *Segunda Comunicación Nacional*. Quito.
- MDMQ. (2011). *Municipio Del Distrito Metropolitano De Quito, Memoria Técnica 2011*. Quito.
- MDMQ. (2014). *Ciudades del Buen Vivir, Quito hacia un Modelo Sustentable: Red Verde Urbana y Ecobarrios*. Quito.
- Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2017). *Tercera Comunicación Nacional del Ecuador sobre Cambio Climático*. Quito.
- Ministerio del Ambiente. (2001). *Comunicación Nacional de la República del Ecuador*. Quito, Ecuador: Gráficas Iberia.
- OMM. (2011). *Organización Meteorológica Mundial*. Recuperado el 23 de 05 de 2019, de https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=124
- Real Academia Española. (2019). Recuperado el 11 de julio de 2019, de Diccionario del español jurídico: <https://dej.rae.es/lema/calentamiento-global>
- Romero, H., & Sarricolea, P. (2016). *Patrones y Factores de Crecimiento Espacial de la ciudad de Santiago de Chile y sus efectos en la generación de Islas de Calor Urbana de Superficie*. Concepción: Centro EULA de Ciencias Ambientales Universidad de Concepción Chile .

- RStudio. (2018). *Funciones de RStudio*. Recuperado el 25 de 06 de 2019, de <https://www.rstudio.com/products/rstudio/features/>
- Secretaría de Ambiente. (2012). Informe final de caracterización de los bosques y vegetación protectores del Distrito metropolitano de Quito. Quito, Ecuador.
- Secretaría De Ambiente. (2012). Los Incendios Forestales en el Distrito Metropolitano de Quito. Quito, Ecuador.
- Secretaría De Ambiente. (2013). Diagnóstico de la Situación Forestal del Distrito Metropolitano de Quito” DMQ. Quito, Ecuador.
- Secretaría de Territorio, Hábitat y Vivienda. (2012). Plan Metropolitano de Ordenamiento Territorial. Quito, Ecuador.
- 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.
- Serrano S, B. L. (2012). La precipitación intensa vista desde la criticalidad autoorganizanda y las transiciones de fase continuas: un nuevo enfoque de estudio. *La Granja*.
- Serrano S., R. A.-C.-I. (2016). Análisis de inundaciones costeras por precipitaciones intensas, cambio climático y Fenómeno de el Niño. *La Granja*.
- Serrano, S. ,. (2012). La precipitación intensa vista desde la criticalidad auto organizanda y las transiciones de fase continuas: un nuevo enfoque de estudio. *La Granja*.
- Serrano, S., Zuleta, D., & Moscoso. (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*.
- Serrano, S., Zuleta, D., Moscoso, V., Jacome, P., Palacios, E., & Villacis, M. (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, Revista de Ciencias de la Vida*.

- Soza, M. V. (2019). Recuperado el 13 de 08 de 2019, de CEC UChile:
<https://www.cec.uchile.cl/~mivalenc/principal.htm>
- Takahashi, K., Montecinos, A., Goubanova, K., & Dewitte, B. (05 de 2011). *Advancing Earth And Space Sciencie*. Obtenido de <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2011GL047364>
- UNESCO. (2018). Recuperado el 05 de 2019, de Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura: <http://whc.unesco.org/en/list/2>
- Villanueva-Solis, J., Ranfla, A., & Quintanilla-Montoya, A. (2012). *Isla de Calor Urbana: Modelación Dinámica y Evaluación de medidas de Mitigación en Ciudades de Clima árido Extremo*. Comala : Informacion Tecnologica.
- WCRP. (2019). *Programa Mundial de Investigación del Clima*. Recuperado el Agosto de 2019, de <https://www.wcrp-climate.org/etccdi>
- Yates, D. (Noviembre de 2013). Distrito Metropolitano de Quito: Análisis Integrado de Amenazas Relacionada. Quito, Pichincha, Ecuador.
- Zambrano-Barragán C., Z. O. (2011). *La estrategia de cambio climático de Quito: una respuesta al cambio climático en el Distrito Metropolitano de Quito, Ecuador*. Springer.

Apéndice

Índices Climáticos No Considerados

A continuación, se muestran los índices que se consideraron para este trabajo con el software Climdex, pero que sin embargo no fueron incluidos dentro del presente como indicadores principales debido a que muchos no aplican puesto que no todos los índices son calculados en una base mensual por lo que para solucionar este inconveniente y obtener un cálculo mucho más apegado a la realidad, dichos índices mensuales son considerados y calculados si en un mes hay no más de 3 días faltantes, mientras que por otro lado, los valores anuales se calculan si en los datos ingresados de todo un año no existen un número mayor a 15 días faltantes, de la misma forma se aplica a no realizar el cálculo si faltan datos de un mes de los doce meses que conforman el año, también se incluye la posibilidad de cálculo de índices con umbral, este mencionado umbral se calcula si cumple que por lo menos el 70% de los datos están correctamente ingresados o por lo menos presentes.

Por otro lado, en cuanto a los indicadores de duración de temporada (marcados con un *) como es el caso de quito que no presenta estaciones marcadas, se considera que una temporada puede continuar en el año siguiente y por lo tanto a esta se la cuenta en el año en que la temporada termina, por ejemplo, una temporada fría (CSDI) en el hemisferio norte que tiene un comienzo el 31 diciembre 2000 y esta ha terminado el 6 enero 2001, se la considera tomando en cuenta dentro del número total de temporadas frías en el 2001.

1. FD0

Este indicador significa Días con helada (Frost Days), este índice muestra la temperatura mínima diaria dentro de un día en un periodo. Este indicador se cumple cuando: $T_{n_{ij}} < 0^{\circ}C$.

2. SU25

Este es el nombre del indicador Días de Verano (Summer Days), este indicador representa la temperatura máxima de un día en un periodo. Por lo tanto, se cuenta el número de días cuando se cumple: $T_{x_{ij}} > 25^{\circ}C$.

3. ID0

Este indicador significa Días con Hielo (Icing Days), no hay que confundir con Días con Helada ya que en este se registra a la temperatura máxima de un día dentro del periodo que se analiza, en esta se cumple el número de días cuando: $T_{x_{ij}} < 0^{\circ}C$.

4. GSL

Este indicador hace mención a Estación de Crecimiento (Growing Season Length), este indica la temperatura media en un día en un periodo, para esta se considera el número de días entre la primera ocurrencia de aumento de temperatura de por lo menos 6 días consecutivos con $T_{ij} > 5^{\circ}C$ y la primera ocurrencia de disminución de temperatura después de 1 Julio (1 de enero registrado en el Hemisferio Sur) de por lo menos 6 días consecutivos cumpliendo con $T_{ij} < 5^{\circ}C$.

5. TXn

Este indicador significa Temperatura Máxima Más Baja, menciona a la temperatura máxima diaria dentro de un mes en un periodo, de esta forma la mínima temperatura máxima de un día dentro de un mes es entonces: $TXn_{kj} = \min(Tx_{kj})$.

6. TNn

Este indicador manifiesta la Temperatura Mínima Extrema, indica la temperatura mínima diaria de un mes dentro de un periodo, entonces la mínima temperatura mínima registrada diariamente en cada mes cumple: $TNn_{kj} = \min(Tn_{kj})$.

7. **Tn10p**

Este índice significa Frecuencia de Noches Frías, en este se manifiesta la temperatura mínima diaria de un día dentro del periodo, este será el día calendario del percentil 10 centrado dentro de una ventana de 5 días (El manual recomienda revisar el cálculo de este usando el método del Anexo D), de esta manera el porcentaje del tiempo se determina con: $Tn_{ij} < Tn_{in10}$.

8. **Tx10p**

Este índice muestra la temperatura máxima diaria en un día dentro de un periodo mientras este día figure en el calendario en el percentil 10, y este centrado dentro una ventana de 5 días (este índice para ser calculado se requiere tomar en cuenta el método del Anexo D del manual del usuario de ClimDex), este índice muestra el porcentaje del tiempo, que es determinado si se cumple: $Tx_{ij} < Tx_{in10}$.

9. **WSDI***

Este índice viene del inglés Warm Spells Duration Index que significa Duración de los periodos Cálidos, este manifiesta la temperatura máxima diaria en el día en el periodo, y debe ubicarse en el día del calendario dentro del percentil 90, el mismo que debe estar centrado en una ventana de 5 días (Para este índice se recomienda revisar cómo funciona su cálculo usando el método mencionado dentro del Anexo D del manual del usuario de ClimDex), por lo tanto para este índice el número de días por periodo será sumado cumpliendo que sean intervalos de por lo menos 6 días consecutivos de la siguiente manera: $Tx_{ij} > Tx_{in90}$.

10. CSDI*

Las siglas de este índice corresponden a Duración de los Periodos Fríos (Cold Spells Duration Index), este muestra la temperatura mínima diaria del día en el periodo y sea mientras este día figure en el calendario dentro del percentil 10 y también este centrado en una ventana de 5 días exactamente (Para comprender de mejor manera lo calculado se recomienda analizar el método utilizado mencionado en el Anexo D), en este índice el número de días por periodo se suma donde, en intervalos de por lo menos 6 días consecutivos se cumpla que: $Tn_{ij} < Tn_{in10}$.

11. RX1day

Este índice muestra el total de precipitación en un día dentro del periodo de datos ingresado, de esta manera los valores máximos de 1 día se cumplirían cuando:

$$Rx1day_j = \max(RR_{ij}).$$

12. Rx5day

Este indicador muestra la cantidad registrada de precipitación dentro de un intervalo de cinco días terminando dentro del periodo que se está analizando, por lo tanto, los valores máximos de 5 días se analizan cuando se cumple: $Rx5day_j = \max(RR_{kj})$.

13. SDII

Las siglas de este índice significan Índice Simple de Intensidad Diaria (Simple Daily Intensity Index), donde este indica la cantidad diaria de precipitación en días húmedos dentro del periodo de datos ingresados, por lo tanto, el número de días húmedos

se representa cuando se cumple: $SDII_j = \frac{\sum_{w=1}^W RR_{wj}}{W}$.

14. R10

Este índice menciona los Días Con Precipitación Mayor a 10 mm, por lo tanto, indica la cantidad diaria de precipitación dentro del periodo que se está analizando, para esto debe cumplirse que: $RR_{ij} \geq 10mm$.

15. TR20

Este indicador menciona a las Noches Tropicales (Tropical Nights), en este se menciona a la temperatura mínima diaria en un día en un periodo, este indicador cuenta el número de días cuando se cumple: $Tn_{ij} > 20^{\circ}C$.

16. Rnn

Este índice muestra la cantidad diaria de precipitación que son mayores a nn mm, esto representa cualquier valor razonable de precipitación diaria, un valor n, se cumple si el análisis en ese número de días de la muestra presenta: $RR_{ij} \geq nnmm$.

17. CWD*

Este es un índice que muestra los Días Húmedos Consecutivos (Consecutive Wet Days), representa la cantidad diaria registrada de precipitación dentro de un día en el periodo de datos ingresados, el número más grande de días consecutivos debe cumplir con: $RR_{ij} \geq 1mm$.

18. PRCPTOT

Este índice muestra la precipitación total diaria en el día en el periodo, para mostrar este número de días se debe cumplir que: $PRCPTOT_j = \sum_{i=1}^I RR_{ij}$.