

UNIVERSIDAD DE CUENCA



FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

**PROYECCIONES FUTURAS DE SEQUÍAS EN REGIONES
CLIMATOLÓGICAS DEL ECUADOR**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN
DEL TÍTULO DE INGENIERO AMBIENTAL**

AUTOR:

MARTÍN PATRICIO MONTENEGRO AMBROSI

CI: 0106503188

DIRECTOR:

ING. LENIN VLADIMIR CAMPOZANO PARRA PhD

CI: 0102677200

CUENCA-ECUADOR 201



RESUMEN

En este estudio se calculó y analizó la variación de los patrones futuros de sequías en las diferentes regiones del Ecuador en el periodo 2041-2070 con respecto al periodo base 1981-2005 mediante el índice de precipitación estandarizado. Se analizó el cambio de los patrones espaciales y temporales de las diferentes categorías de sequía en regiones del Ecuador, y se identificó los cambios espaciales y temporales más significativos en el escenario de emisiones medias RCP 4.5 y emisiones altas RCP 8.5. El uso de una base de datos histórica (1981-2005), los modelos de circulación global GCMs producto del CMIP5 y sus respectivos escenarios de emisiones, y sus resultados a reducción de escala mediante WRF para el periodo base (1981-2005) y proyecciones futuras para el periodo 2041-2070 en el escenario de emisiones RCP 4.5 y RCP 8.5, son herramientas que permitieron analizar la variación futura de sequía entorno al cambio climático mediante el cálculo del índice de precipitación estandarizado. La evaluación de las proyecciones de sequías para el periodo 2041-2070 mediante el índice de precipitación estandarizado permitió identificar una drástica disminución de la frecuencia de todas las categorías de sequía en todo el Ecuador para el escenario de emisiones medias RCP 4.5. Para el escenario de emisiones altas RCP 8.5 se prevé una disminución más drástica de la frecuencia de todas las categorías de sequía en el Ecuador. Las regiones en las que se prevé reducciones más drásticas de frecuencia de sequía tanto espacial y temporal son la sierra y el oriente.

Palabras clave:

Índices de sequía en el Ecuador, Cambio climático en el Ecuador, Proyecciones futuras de sequía, variación de patrones espaciales y temporales de sequías, SPI.

ABSTRACT

In this study, the variation of future drought patterns in the different regions of Ecuador in the period 2041-2070 was calculated and analyzed with respect to the base period 1981-2005 through the standardized precipitation index. For the analysis the change of the spatial and temporal patterns of the different drought categories in regions of Ecuador was identified, and it was analyzed the most significant spatial and temporal changes that can be made. Produce climate change in the country in the scenario of middle emissions RCP 4.5 and high emissions RCP 8.5. The use of a historical database (1981-2005), the global circulation models GCMs product of CMIP5 and their respective emissions scenarios, and their results, a reduction of scale through WRF for the base period (1981-2005) and future projections for the period 2041-2070 in the emissions scenario RCP 4.5 and RCP 8.5, tools that allowed analyzing the future variation of the drought around climate change by calculating the standardized precipitation index. The evaluation of drought projections for the 2041-2070 period using the standardized precipitation index allows us to identify a rate of decrease in the frequency of all drought categories throughout Ecuador for the scenario of average emissions RCP 4.5. For the scenario of high emissions RCP 8.5, a more dramatic decrease in the frequency of all the drought categories in Ecuador is expected. The regions in which the most drastic divisions of drought frequency are reduced, both spatial and temporal, are the sierra and the oriente.

Keywords:

Drought indices in Ecuador, Climate change in Ecuador, Future drought projections, variation of spatial and temporal drought patterns, SPI.



CONTENIDO

I.	INTRODUCCIÓN	11
1.1	Antecedentes	12
1.2	Justificación	13
1.3	Objetivos	14
II.	MARCO TEÓRICO.....	15
2.1	Terminología básica	15
2.1.1	Sequias	15
2.1.2	Índice de sequía.....	16
2.1.3	Índice de precipitación estandarizado (SPI).....	17
2.1.4	Cambio climático.....	19
2.1.5	Escenarios de cambio climático	20
2.1.6	Modelos climáticos	21
2.1.7	Modelos climáticos regionales.....	22
2.1.8	Especificaciones de los tres modelos del CMIP5 utilizados.	23
2.1.9	CSIRO -MK3.6.0 (MK36).....	23
2.2.0	GISS-E2-R.....	24
2.2.1	IPSL-CM5A-MR	24
2.2.2	Modelo regional de clima Weather Research and Forecasting (WRF)	24
2.2.3	Interpolación Kriging ordinario.	25
III.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	26
3.1	Materiales	26
3.1.1	Descripción del área de estudio	26
3.1.2	Datos de las observaciones	20
3.1.3	Datos de los modelos climáticos globales.....	20
3.1.4	Datos de los modelos regionales de clima.	21
3.2	Métodos	21
3.2.1	Control de calidad y homogeneidad de observaciones.	21
3.2.2	Análisis de índices de sequía en el Ecuador y formulación de los índices.	22
3.2.3	Índice de precipitación estandarizado (SPI).....	22
3.2.4	Porcentaje de precipitación normal (PPN).....	25



3.2.5 Z-Score.....	26
3.2.6 Índice de deciles (ID).	26
3.2.7 Criterios de comparación.	27
3.2.8 Proyecciones futuras de sequía.	27
3.2.9 Evaluación de patrones temporales de sequía.	29
3.3.1 Evaluación de patrones espaciales de sequía.	30
IV. RESULTADOS	31
4.1 Análisis de índices de sequía.	31
4.1.1 Análisis de frecuencia.....	31
4.1.2 Análisis espacial de índices de sequía.	33
4.2 Proyecciones futuras de sequía.	36
4.2.1 Análisis de los modelos en el periodo base.	36
4.2.2 Proyecciones futuras de sequias de modelos W-GCMs para los escenarios RCP (4.5 y 8.5)	39
4.2.3 Variación de patrones temporales de sequía.	45
4.2.4 Proyecciones de los patrones espaciales de sequía.....	51
V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	57
5.1 Conclusiones.....	57
5.1.1 Análisis de índices de sequía	57
5.1.2 Proyecciones futuras de sequia	57
5.1.2 Análisis de patrones temporales.....	58
5.1.3 Variación de patrones espaciales.....	59
5.2 Recomendaciones.	59
VI. BIBLIOGRAFÍA.....	60
VII. ANEXOS	66

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1: Ubicación geográfica de estaciones meteorológicas.</i>	<i>19</i>
<i>Figura 2: Representación espacial del Ecuador de tres modelos globales del CMIP5 utilizados en la TCN.</i>	<i>20</i>
<i>Figura 3: Frecuencia absoluta de la diferencia de SPI vs Z-Score, PPN e ID en regiones del Ecuador a escala temporal de 3 meses.</i>	<i>31</i>
<i>Figura 4: Frecuencia absoluta de la diferencia de SPI vs Z-Score, PPN e ID en regiones del Ecuador a escala temporal de 9 meses.</i>	<i>32</i>
<i>Figura 5: Representación espacial de la diferencia de SPI vs Z-Score, ID, PPN) en el Ecuador a escala de 3 meses.</i>	<i>34</i>
<i>Figura 6: Representación espacial de la diferencia de SPI vs Z-Score, ID, PPN en el Ecuador a escala de 9 meses.</i>	<i>35</i>
<i>Figura 7: Frecuencia relativa de sequía extrema en regiones del Ecuador de Obs, GCMs y W-GCMs en el periodo base (1981-2005).</i>	<i>36</i>
<i>Figura 8: Frecuencia relativa de sequía severa en regiones del Ecuador de Obs, GCMs y W-GCMs en el periodo base (1981-2005).</i>	<i>37</i>
<i>Figura 9: Frecuencia relativa de sequía moderada en regiones del Ecuador de Obs, GCMs y W-GCMs en el periodo base (1981-2005).</i>	<i>38</i>
<i>Figura 10: Frecuencia relativa de sequía extrema en regiones del Ecuador.</i>	<i>40</i>
<i>Figura 11: Frecuencia relativa de sequía severa, en regiones del Ecuador.</i>	<i>41</i>
<i>Figura 12: Frecuencia relativa de sequía moderada, en regiones del Ecuador.</i>	<i>43</i>
<i>Figura 13: Análisis de la variación temporal de los patrones de sequía en la región costa del Ecuador.</i>	<i>45</i>
<i>Figura 15: Análisis de la variación temporal de los patrones de sequía en la región oriental del Ecuador.</i>	<i>49</i>
<i>Figura 16: Patrones espaciales de la frecuencia relativa de sequía extrema.</i>	<i>51</i>
<i>Figura 17: Patrones espaciales de la frecuencia relativa de sequía severa.</i>	<i>53</i>
<i>Figura 18: Patrones espaciales de la frecuencia relativa de sequía moderada.</i>	<i>55</i>

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1: Categorización de SPI y su frecuencia.</i>	<i>19</i>
<i>Tabla 2: Estaciones consideradas en este estudio.</i>	<i>0</i>
<i>Tabla 3: Categoría de SPI, Z-Score, ID, PPN.</i>	<i>27</i>



Cláusula de Propiedad Intelectual

Martín Patricio Montenegro Ambrosi autor/a del trabajo de titulación "PROYECCIONES FUTURAS DE SEQUÍAS EN REGIONES CLIMATOLOGICAS DEL ECUADOR", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, 23 de febrero del 2018

Martín Patricio Montenegro Ambrosi

C.I: 0106503188



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio
Institucional

Martín Patricio Montenegro Ambrosi en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "PROYECCIONES FUTURAS DE SEQUÍAS EN REGIONES CLIMATOLÓGICAS DEL ECUADOR", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 23 de febrero del 2018

Martín Patricio Montenegro Ambrosi

C.I.: 0106503188



DEDICATORIA

Esta tesis está dedicada a mi familia, en especial a mis hermanas y mi padre por su apoyo incondicional. Y a la memoria de mi madre (1970-2010) por ser un ejemplo y motivación para mi vida.



AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer a todas las personas que han colaborado para la culminación de esta tesis. De manera especial a la Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático (MAE-TNC), al Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) y al Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales (IDRHICA) a mi familia por estar apoyando siempre en las situaciones difíciles. Al Ing. Lenin Campozano por su supervisión y dedicación en esta tesis.



ACRÓNIMOS UTILIZADOS

CMIP5: Fase 5 de intercomparación de modelos acoplados

SPI: Índice de precipitación estandarizado

IPCC: Panel Intergubernamental de CC

MAE-TCN: Ministerio del Medio Ambiente- Tercera Comunicación del CC

RCM: Modelo de Circulación Regional

RCP: Trayectorias de Concentración Representativas

WRF: Weather Research and Forecasting

GCMs: Modelo de Circulación Global

W-GCMs: Modelo de Circulación Global con reducción de escala con WRF

SE: Sequía extrema

SS: Sequía severa

SM: Sequía moderada



I. INTRODUCCIÓN

Durante la última centuria, se han evidenciado incrementos de temperatura sin precedentes en escalas de décadas a siglos (Mora et al., 2014). Varios autores atribuyen este aumento a causas antropogénicas, que aumentan el efecto invernadero, debido a la contaminación del aire por la industrialización, crecimiento económico, poblacional y a la quema de combustibles fósiles en general. Estos aumentos de temperatura producen cambios generalizados en las cantidades de precipitación, salinidad de los océanos, patrones de vientos, eventos extremos de lluvias, ondas de calor e intensidad de los ciclones tropicales y sequías (Buytaert et al., 2010). Estos cambios en las variables climáticas generan mayor incertidumbre en los eventos extremos sobre todo las posibles inundaciones y sequías que son los fenómenos que más afectan a la sociedad debido a sus consecuencias en los sectores urbanos, agrícolas, energéticos y ecológicos.

Las sequías se consideran una anomalía climática transitoria en la que la disponibilidad de agua en un área determinada se encuentra por debajo de su media habitual durante un periodo prolongado de tiempo. En dicho caso el agua no es suficiente para abastecer las necesidades de la población y el medio ambiente (Samaniego et al., 2009).

Entre los impactos más importantes causados a nivel ambiental por las sequías están: aceleración de procesos de desertización, incremento en el riesgo de incendios forestales, reducción de la disponibilidad de recursos hídricos para uso doméstico e industrial, daños a especies animales y vegetales. Los impactos socioeconómicos generados son: pérdida de cultivos y ganado, disminución de la generación hidroeléctrica, migración, degradación de paisaje, conflictos sociales entre otros (Rivera, 2014).

Según la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2012), las pérdidas asociadas a fenómenos hidrometeorológicos relacionados a sequías e inundaciones están tendiendo a disminuir. La reducción de efectos está directamente relacionada con programas de prevención, alerta temprana y capacitación de acciones frente a emergencias.

En este trabajo se estudiará la sequía meteorológica debido a que antecede a los demás tipos de sequía y es un primer paso importante para entender la sequía

En la actualidad el monitoreo de sequías se lo realiza mediante el cálculo de índices que son desarrollados con el fin de identificar el inicio y fin de un periodo de sequía. Estos índices ayudan a la detección y mitigación mediante planes de alertas temprana. El cálculo de varios índices puede mejorar la toma de decisiones, sin embargo, los mismos deben ser analizados y entendidos de manera adecuada para una óptima interpretación de resultados. La variedad de índices encontrados en la literatura presenta incertidumbre en cuanto a cual expresa mejor los eventos extremos de precipitación. El análisis de índices nos permite evaluar su comportamiento en una zona en particular, esto ayudará a la toma de decisiones y una óptima caracterización de eventos sequías (Rivera, 2014).

Los índices usados para la determinación de sequías son calculados con datos climatológicos (precipitación y en algunos casos temperatura). Sin embargo, ningún índice es universal ni absoluto. La elección de un índice para el monitoreo puede estar sujeto a un área específica, a la calidad de la base de datos y a la consistencia de detección en tiempo y espacio durante un evento de sequías (Morid et al., 2006). En el Ecuador no se han encontrado estudios sobre análisis de índices por lo que es importante analizar su comportamiento, debido a la variabilidad espacio-temporal del clima en nuestro país.

1.1 Antecedentes

Estudios realizados usando el índice de precipitación estandarizado, SPI, muestran un dramático incremento de sequías meteorológicas en Europa occidental a finales del siglo XXI en relación al siglo XX en escenarios de emisiones medias. Proyecciones con el índice de palmer (PDSI) sugieren que las sequías pueden afectar el 30% del área terrestre mundial para el año 2100 en comparación con la cobertura actual que es del 1% aproximadamente (HisdaL et al., 2001). Por otro lado (Strzepek et al., 2010) realizó la caracterización de sequías para el cambio climático y las proyecciones muestran que una menor tasa de emisiones están asociadas a una menor frecuencia de sequías en los Estados Unidos.

En el Ecuador los estudios sobre sequías son escasos, sin embargo se destacan los realizados por (Avilés et al., 2015) en los cuales usa cadenas de Markov de primer y segundo orden en la microcuenca del río Chulco para pronosticar sequías; y Aviles et al.,(2016) donde se comparó modelos basados en cadenas de Markov y modelos basados en redes Bayesianas donde se concluyó que los modelos basados en redes Bayesianas

predicen de manera más acertada los eventos de sequías severas. En este contexto los estudios antes mencionados generan proyecciones de sequías a corto plazo, alrededor de 3 a 6 meses de proyección.

1.2 Justificación

Las sequías generalmente afectan a varias regiones del mundo, es uno de los fenómenos meteorológicos menos entendidos y que producen graves pérdidas económicas. En el Ecuador los eventos de sequía han afectado a la agricultura y ganadería, generando cuantiosas desventajas económicas. En el 2011, las provincias de Los Ríos, Manabí, Santa Elena, Guayas, El Oro y Loja las pérdidas ascendieron a \$46M por el déficit de lluvias. Es por eso que se han desarrollado varios índices con el fin de monitorear las sequías. Esta variedad de índices puede confundir a los tomadores de decisiones, es por eso que un análisis de índices de sequía en el Ecuador ayudara a que se tenga una percepción clara de cómo aplicar los diferentes índices y los resultados que presenta en la diversidad de climas que presenta el Ecuador.

La identificación de sequías para un determinado periodo de tiempo es importante sobre todo en un país como el Ecuador por su elevada producción agrícola y proyectos de generación hidroeléctrica. El análisis de sequías en una determinada cantidad de años permite un manejo sustentable de los recursos hídricos y ayuda a un adecuado diseño de infraestructura (Rivera, 2014). Diferentes autores creen que se puede minimizar los impactos de las sequías si llegan a ser pronosticadas (Velasco et al., 2005). Esto evidencia la necesidad de identificar periodos de escasez de agua. Por esta razón, este estudio tiene por objeto realizar las proyecciones en los cambios de los patrones de sequía en el Ecuador para productos del CMIP5. Los resultados obtenidos contribuirán a una mejor gestión de recursos hídricos en el Ecuador y ayudar a los sectores urbanos, agrícolas y energéticos, demás ámbitos sociales y ambientales dependientes del preciado recurso hídrico.

Para las proyecciones futuras se utilizará el periodo 2041-2070, debido a que es un periodo de tiempo futuro en el cual se prevé que los cambios en los patrones de sequía sean importantes, de manera que se pueda evaluar con los del periodo base e identificar

los cambios más importantes y permita evaluar los dos escenarios de cambio climático en las 3 regiones del Ecuador.

La importancia de este estudio tiene trascendencia nacional, especialmente para entidades como el MAGAP (Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca), SENAGUA (Secretaría Nacional del Agua), CELEC EP (Corporación Eléctrica del Ecuador), ETAPA EP (Empresa Pública Municipal de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento), Empresa Metropolitana de Agua Potable (EPMAPS), INTERAGUAS entre otras. Además, aporta al estado del arte del conocimiento en sequías comparando los resultados del proceso de reducción de escala con los resultados directos de los modelos climáticos globales (GCMs).

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general:

- Generar proyecciones futuras de sequías en regiones climatológicas del Ecuador.

1.3.2 Objetivos específicos:

- Identificar el índice de sequía que mejores resultados presenta para el Ecuador.
- Realizar proyecciones de sequías para productos del CMIP5.
- Evaluar la variación en los patrones espaciales y temporales de sequía.

II. MARCO TEÓRICO

2.1 Terminología básica

2.1.1 Sequias

La sequía es uno de los desastres naturales más costosos y menos entendidos, esto se debe principalmente a la dificultad para delimitar su comienzo y su fin. Su desarrollo generalmente se produce de manera lenta y posee algunas fases a nivel de cada región dependiendo de las condiciones meteorológicas propias de la zona. La sequía, es el evento meteorológico de mayor duración y menor predictibilidad (Mishra y Singh, 2010). Los impactos pueden ser variados dependiendo en la época en la que se genere y la sensibilidad de los ecosistemas y la población. Este fenómeno puede ocurrir en cualquier zona climática tanto en regiones húmedas como secas y se puede dar en cualquier periodo del año.

La sequía tiene varias definiciones. Desde la perspectiva de disponibilidad de agua es definida como eventos extremos persistentes que producen impactos significativos en el ciclo hidrológico, por ejemplo sus afecciones se aprecian como reducción de caudales, reducción de la calidad de agua, pérdida de humedad del suelo, disminución de niveles freáticos (María de los Milagros Skansi & Natalia Herrera, 2016). También se pueden apreciar impactos socio-económicos, mediante la merma en el rendimiento agropecuario lo que puede llevar a un alza de productos alimenticios, al disminuir los caudales limita la generación hidroeléctrica, aumento en la concentración de sustancias tóxicas de los reservorios.

Según (María de los Milagros Skansi & Natalia Herrera, 2016) las sequías se encuentran generalmente categorizadas en 4 grupos:

- **Sequía meteorológica:** es una expresión de la desviación de la precipitación respecto a la media en un periodo prolongado de tiempo para una región determinada. Este tipo de sequía antecede a otros tipos, debido a que la disminución de precipitación afecta a la humedad del suelo y disminución de escorrentía superficial.
- **Sequía hídrica:** hace referencia al déficit de agua subterránea o superficial. Al producirse un desfase entre la falta de precipitación y la reducción del caudal de los ríos, lagos, embalses, etc. Este tipo de sequía se desarrolla más

paulatinamente debido a que involucra disminución drástica de acuíferos y reservorios.

- Sequía agrícola: se produce cuando la humedad del suelo no satisface las demandas de un determinado cultivo en cualquiera de las fases de su desarrollo. Para monitoreo de sequías agrícolas se han desarrollado varios índices, los cuales están en función de la precipitación, temperatura humedad del suelo entre otras variables.
- Sequía socioeconómica: se da en lugares donde la disponibilidad de agua disminuye hasta producir daños y pérdidas socioeconómicas a la población afectada. Para estimar este tipo de sequía generalmente se usan índices monetarios.

2.1.2 Índice de sequía

Los índices de sequía son representaciones cuantitativas que indican la gravedad de las sequías, generalmente son determinados mediante el uso de datos climáticos o hidrometeorológicos. Su principal objetivo es analizar el estado de sequías en un periodo de tiempo determinado. Analizar el clima en diversas escalas temporales permite reconocer los períodos húmedos de corta duración dentro de las sequías de larga duración o los períodos secos de corta duración dentro de los períodos húmedos de larga duración. Los índices pueden simplificar relaciones complejas y brindar valiosos instrumentos para la comunicación con distintos públicos y usuarios, incluida la población general.(Rivera, 2014).

El desarrollo cronológico de una sequía puede tener tanta relevancia como su gravedad en el diagnóstico de los efectos y las consecuencias. Una sequía Inter-estacional breve y de gravedad relativamente baja, en caso de que se produzca durante el período de sensibilidad a la humedad de un cultivo estable, puede tener un efecto más devastador en el rendimiento de la cosecha que una sequía más prolongada y grave registrada en un momento menos crucial del ciclo agrícola. En consecuencia, los índices de sequía, junto con la información complementaria sobre los impactos generados y sus características relativas a la vulnerabilidad, son esenciales para seguir y prever los efectos y las consecuencias de las sequías. Hay índices que también pueden cumplir otra función esencial, en el sentido de que pueden facilitar una referencia histórica a los planificadores o las instancias de toma de decisiones. Esta referencia brinda a los usuarios información

sobre la probabilidad de que se produzcan o se repitan sequías de distintos niveles de gravedad. No obstante, cabe destacar que el cambio climático comenzará a alterar las tendencias históricas (Svoboda ., et al 2012).

2.1.3 Índice de precipitación estandarizado (SPI).

El SPI es un índice probabilístico el cual cuantifica la sequía en función de la precipitación en un periodo de tiempo dado (por ejemplo, un mes, tres meses etc.) y el número de años usado para su cálculo. Un SPI con el valor de cero indica que la precipitación para ese punto específico está en su valor medio. El SPI toma valores positivos, esto indica que la precipitación está por encima de la media y se interpreta como condiciones húmedas. Finalmente, los valores de SPI negativos señalan una desviación de la media de precipitación lo cual se traduce en condiciones secas (tabla 1). Este índice fue propuesto por McKee., et al 1993, y desde entonces su uso se ha popularizado ampliamente. Debido a su enfoque únicamente en la precipitación, los eventos de escasez determinados por SPI son más relevantes para actividades que dependen directamente de la lluvia, como la agricultura, suministro de agua municipal en ciertas regiones, entre otras. El SPI a diferencia de otros índices define la sequía de manera estadista con referencia en las condiciones locales, esto quiere decir que el SPI genera una posibilidad de que ocurra un evento apoyado en los datos históricos de una zona en particular, lo que permite que sus resultados sean más relevantes a nivel local y regional (Rivera, 2014).

El SPI es recomendado como índice de sequía primario debido a que es simple, probabilístico e invariante en su interpretación y su uso para la investigación está altamente aceptado debido a su normalización en tiempo y espacio. El SPI permite el monitoreo de condiciones húmedas y secas, sin embargo, su uso es más generalizado para la cuantificación de sequias. Según la organización meteorológica mundial el SPI debe ser usado para la caracterización de sequias meteorológicas por los servicios Meteorológicos e hidrológicos alrededor del mundo. Por esta razón la OMM desarrollo una guía de uso para una adecuada interpretación de SPI (Rivera, 2014).

Svoboda ., et al 2012 analizaron las principales ventajas y limitaciones del SPI. Entre las principales factibilidades para su uso se destacan:

- Su simplicidad, debido a que para su cálculo solo se requieren datos de precipitación, esto favorece la aplicación del índice en países en vías de desarrollo.

Sin embargo, este mismo criterio puede ser tomado como una debilidad, pero debido a la dificultad para obtener datos de otras variables como evapotranspiración, humedad del suelo, se considera que la aplicación de este índice es adecuada para el área de estudio.

- Su estandarización, esto permite comparar resultados en regiones con regímenes de precipitaciones diferentes y la clasificación para frecuencias de sequías a escala temporal es consistente.
- EL SPI es versátil, puede ser calculado en diferentes escalas de tiempo (1,3,6,9,12,24 meses) esto permite la caracterización de sequías meteorológicas, hidrológicas, agrícolas y meteorológicas, además permite el monitoreo de dinámicas temporales de las sequías y se pueden identificar periodos de desarrollo y declive de eventos de sequía, lo cual es difícil para otros índices (Rivera, 2014).
- El SPI no depende de la humedad del suelo por lo que su cálculo es adecuado para invierno como en verano, y no le afectan diferencias de topografía o geografía.

Las desventajas y limitaciones del SPI son las siguientes:

- Para el cálculo de SPI se ajusta a una distribución teórica previo a la estandarización. Para dicho proceso se recomienda 30 años de datos de precipitación de calidad adecuada para que los valores de SPI sean adecuados y confiables.
- La distribución espacial de estaciones utilizadas es necesario para una correcta interpretación de los patrones espaciales de sequías.
- Debido a su estandarización, las interpretaciones del SPI en regiones con escasa estacionalidad puede ser errónea en cortas escalas de tiempo.
- El SPI debe recalcularse en caso de incorporar nuevos datos, debido a que estos podrían contener eventos extremos y por consiguiente se dé un cambio en los parámetros de forma de la distribución gamma.

Tabla 1: Categorización de SPI y su frecuencia

Categoría	SPI	Probabilidad
Húmedo	≥ 1.0	15.9%
Normal	-0.99 a 0.99	68.2%
Sequía moderada	-1.49 a -1.00	9.2%
Sequía severa	-1.99 a -1.50	4.4%
Sequía extrema	≤ -2.00	2.3%

Fuente:(Lloyd-Hughes & Saunders, 2002)

2.1.4 Cambio climático

El cambio climático se define como una variación estadística de los patrones meteorológicos que se prolonga a lo largo del tiempo (décadas a miles de años) o en la variación meteorológica de las condiciones promedio a largo plazo que puede generar mayores o menores fenómenos meteorológicos extremos. Este proceso es atribuible a causas de variabilidad natural del sistema o factores externos como: cambios de los ciclos solares, factores antropogénicos que cambian la composición de la atmósfera y del uso del suelo, erupciones volcánicas entre otras (Council, 2011). Existe un punto de inflexión respecto al cambio climático natural y cambio climático atribuible a actividades humanas. El calentamiento global es uno de los factores que acelera de manera más vertiginosa el cambio climático, esto se evidencia en el aumento observado y proyectado de la temperatura de la superficie del globo terrestre atribuido principalmente a las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmosfera (IPCC, 2014).

La variación producida en las precipitaciones generadas por el cambio climático puede afectar directamente a ecosistemas que son muy sensibles a estos cambios como es el páramo andino (Buytaer et al., 2010). Con el aumento de la temperatura media de la superficie de la tierra podría aumentar el deshielo de los nevados a nivel mundial.

Los Andes es considerado uno de los ecosistemas más diversos y que mayor cantidad de servicios ambientales brinda a la sociedad, sin embargo, es una de las regiones que podría verse más afectada por el aumento de la temperatura media de la superficie de la tierra. Esto podría provocar disminución de la nieve de los glaciares en Colombia, Perú, Bolivia y Ecuador debido a posibles precipitaciones y sequías más intensas (Buytaer et al., 2010).

2.1.5 Escenarios de cambio climático

Los escenarios de cambio climático son la combinación de condiciones plausibles, basadas en un conjunto de suposiciones coherentes, que puedan representar como puede evolucionar la sociedad y que repercusiones tendrá dicha evolución en el clima. Los escenarios de CC generalmente se usan para evaluar los impactos, vulnerabilidades de posibles condiciones futuras, la respuesta de organizaciones e individuos, y la manera de estar preparados para enfrentar dichas condiciones (Pachauri et al., 2014).

Los GCMs son las herramientas más usadas para el estudio del clima, y mediante los cuales se puede generar proyecciones del cambio climático y así analizar sus impactos (Pachauri et al., 2014). Los GCMs son modelos matemáticos capaces de evaluar los cambios en clima según los cambios en los forzamientos climáticos (tasa de emisión de gases de efecto invernadero, irradiación solar, etc.). Generan un gran número de datos de variables del clima a escala global. La habilidad de los GCMs para la generación de una adecuada proyección de cambio climático está ligada a distintas metodologías, formulaciones y/o métodos de resolución de las ecuaciones que describen la dinámica de atmósfera y océano, los esquemas numéricos, las parametrizaciones de los procesos físicos, las resoluciones espaciales y temporales empleadas, la interacción de los subsistemas como el uso de suelo etc.

Los escenarios futuros diseñados para el CMIP5 son basados en RCP “trayectorias de concentraciones representativas”. Dichas trayectorias son 4:

Escenario de mitigación en el cual está dado por un RCP (2.5) en el cual la radiación de forzamiento se estabiliza en 2.5 W/M² para el año 2100 con el objetivo de limitar el aumento de la temperatura media global a 2 ° C, presenta emisiones negativas del uso de energía en la segunda mitad del siglo XXI, las emisiones acumuladas de gases de efecto invernadero de 2010 a 2100 deben reducirse en un 70%. Este escenario basado

específicamente el uso de medidas de bioenergía y reforestación tienen claras consecuencias para el uso global de la tierra (Vuuren, Stehfest, et al., 2011).

Escenarios emisiones medias RCP 4.5 y RCP 6 en los cuales la radiación de forzamiento se estabiliza en 4.5 W/m² y 6 W/M² respectivamente para finales del 2100, limita las emisiones para alcanzar este objetivo, impulsa los cambios en el sistema de energía, incluidos los cambios a la generación de electricidad, las tecnologías de energía de emisiones más bajas y al despliegue de tecnología de captura de carbono y almacenamiento geológico, también se aplica a las emisiones de uso de la tierra; Como resultado, las tierras forestales se expanden desde su extensión actual (Thomson et al., 2011).

Escenario. emisiones altas RCP (8,5), combina supuestos de sobrepoblación alta y crecimiento de ingresos relativamente lento con tasas moderadas de cambio tecnológico y mayor demanda en la intensidad energética, lo que lleva a largo plazo a una gran demanda de energía y emisiones de GEI en ausencia de políticas de cambio climático. La radiación de forzamiento se estima de 8,5 W/M² para finales del 2100 (Vuuren, Edmonds, et al., 2011).

2.1.6 Modelos climáticos

Los modelos climáticos son representaciones matemáticas del clima. Estos permiten simular la manera en que el clima regional y global puede cambiar como resultado de las influencias antropogénicas (Rivera, 2014).

Existen modelos tanto para climas regionales como para el clima global. Los modelos para el clima global varían desde los sencillos y unidimensionales como el MAGICC, hasta los modelos más complejos como los de circulación general (GCMs). Los GCMs modelan en base a ecuaciones alrededor de una esfera rotatoria, se usan ecuaciones termodinámicas para las diversas fuentes de energía.

Los GCMs más antiguos, desarrollados hasta aproximadamente los inicios de la década de los 90, tendían a simular las condiciones actuales y las condiciones estables en el futuro, normalmente para el cambio en las concentraciones de CO₂. Desde entonces, han sido desarrollados GCMs más sofisticados. Tales simulaciones son referidas como de desarrollo “transitorio”. Estos modelos más nuevos son modelos “emparejados”, es

decir, son capaces de simulan la atmósfera y los océanos, así como sus interacciones. Se denominan modelos de circulación general atmósfera-océano (AOGCMs).

Los GCMs actuales ofrecen la más completa representación del sistema climático. Con una resolución aproximada de 2.5° (aprox. 278Km) y entre 10 a 20 capas verticales para la atmosfera y hasta 30 para los océanos. Las expresiones matemáticas se pueden analizar como:

- La dinámica del sistema del clima que describe el movimiento a gran escala de las masas de aire y el transporte de la energía y momento.
- La física del sistema climático y la transmisión de la radiación a través de la atmósfera, la termodinámica y la evaporación.
- Otros factores en los que se encuentran la interacción océano-atmósfera, la topografía, y parámetros que representan la dinámica de la vegetación.

Los procesos físicos que se desarrollan a una escala de sub-grilla, como los relacionados en la generación de nubes o la convección oceánica utiliza la técnica de parametrización (Rodríguez, 2010).

En la actualidad los GCMs presentan mucha incertidumbre y generalmente requieren una resolución más alta (cuadriculas más pequeña). Según Moss et al., 2010 para desarrollar productos de mayor resolución, los resultados del GCMs son reducidos en escala, es decir, son transformados a resultados de menor escala que las cuadrículas de GCM. Hay tres opciones básicas para realizar la simplificación:

- Productos de GCM combinados con observaciones históricas
- Reducción de escala estadística.
- Modelos climáticos regionales.

2.1.7 Modelos climáticos regionales

Los modelos climáticos regionales (RCMs) son los modelos de mayor resolución enfocados a una región, normalmente a escala continental o sub-continental. Sus cuadrículas cubren desde 50 kilómetros o menos. Por lo tanto, son capaces de capturar muchas características regionales que los GCMs no pueden. Sin embargo, los RCMs se

deben integrar con las condiciones de frontera de los GCMs (por ejemplo, cambios en patrones de presión, temperaturas de la superficie de mar). Algunas de sus aplicaciones son para periodos de tiempo limitados, por ejemplo, para una década simulada. La ventaja de los RCMs es que pueden proporcionar una mejor representación espacial del cambio climático que los GCMs, pero no pueden corregir los errores en condiciones de frontera.

2.1.8 Especificaciones de los tres modelos del CMIP5 utilizados.

En la 5 fase de intercomparación de modelos acoplados (CMIP5) se logró iniciar un nuevo conjunto de experimentos de modelados del cambio climático en los cuales destacan los siguientes cambios (IPCC, 2014):

- Integraciones a largo plazo (siglos) suelen iniciarse a partir del control preindustrial multicéntrico. Es decir que las integraciones de datos se efectúan a partir de la época preindustrial como punto de partida.
- Integraciones a corto plazo (10-30 años), comienzan con las condiciones observadas en los océanos y el hielo marino, mediante lo cual pueden usar emisiones que cambian en el tiempo y a partir de estos las concentraciones son computarizadas de manera interactiva.

En el Ecuador se analizaron 43 modelos del CMIP5 de los cuales se evaluó la precipitación para el proyecto MAE-TNC y se llegó a la conclusión de que los modelos CSIRO-MK3-6-0, GISS-E2-R y IPSL-CM5A-MR presentan una mejor modelación de clima en el Ecuador (Knutti & Sedláček, 2013).

2.1.9 CSIRO -MK3.6.0 (MK36)

El modelo dinámico/termodinámico MK36 presenta una resolución horizontal de aproximadamente 1.9 grados de latitud y longitud (espectral T63) y es añadido el componente de hielo marino en el modelo atmosférico. Tiene 31 niveles verticales y cada cuadrícula atmosférica está ligado a dos capas oceánicas. El MK36 es desarrollado a partir de su versión anterior MK3.5 y una de sus mejoras es la inclusión de un aerosol interactivo, radiación actualizada y esquema de capa límite con propiedades de vegetación prescrita. Se realizó también un aumento de resolución con la finalidad de mejorar la variabilidad tropical. Este modelo fue desarrollado por la institución

Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation in collaboration with the Queensland Climate Change Centre of Excellence (Collier ., et al 2013).

2.2.0 GISS-E2-R

Este modelo fue desarrollado por Goddard Institute for Space Studies (GISS). Para la fase 5 del proyecto de intercomparación de modelos acoplados, se usaron seis variaciones para el tratamiento y la composición atmosférica, el cálculo del efecto indirecto de los aerosoles y un componente del modelo oceánico. Este modelo tiene una resolución espacial de $2.5^\circ \times 2^\circ$ y se acopla a un modelo oceánico de $1^\circ \times 1.25^\circ$ (Schmidt et al., 2014). Según Schmidt et al., 2014 presenta tres versiones de cómo se manejan los aerosoles y la química que se produce en la atmósfera:

- El ozono y los aerosoles se producen en campos transitorios y ozono precalculado.
- La química atmosférica se calcula en línea en función de las condiciones atmosféricas y los inventarios de emisiones.
- Se calculan los impactos atmosféricos y los inventarios de emisiones, también se calcula impacto de los aerosoles sobre las nubes.

2.2.1 IPSL-CM5A-MR

El modelo IPSL-CM5A-MR es desarrollado por el instituto Institut Pierre-Simon Laplace, presenta algunas diferencias importantes frente a su antecesor el IPSL-CM4 entre ellas las grillas del componente atmosférico horizontal y vertical refinada. Esto da como resultado una reducción sistemática de los sesgos en la media de las estructuras troposféricas. El modelo aumento el número de capas verticales de 19 a 39 (15 en la estratósfera), este cambio permite capturar patrones dominantes y calentamiento repentinos en la capa troposférica. Modelos para el ciclo del carbono oceánico y terrestre y el cambio de usos de suelo puede ser impuesto externamente (Hourdin et al., 2013).

2.2.2 Modelo regional de clima Weather Research and Forecasting (WRF)

El modelo de investigación y predicción meteorológica (WRF) es desarrollado por varias agencias con el fin de proporcionar un modelo de mesoescala de nueva generación que permita una asimilación de datos de manera que mejore la compresión y predicción del clima a mesoescala que se ha convertido en el más utilizado en el mundo durante los últimos años para el pronóstico de campos de variables meteorológicas (componentes de

velocidad del viento, la temperatura, humedad relativa y la altura geopotencial en los niveles de presión) a escala regional. Las características principales son su dinámica no hidrostática y de su capacidad de permitir el uso de resoluciones espaciales de unos pocos kilómetros (Moya & Ortega, 2015). Da la posibilidad de varias opciones de configuración y de parametrizaciones físicas (radiación de onda corta y larga, la formación de cúmulos, la difusión, la advección, la capa límite planetaria, y los procesos de formación de hielo y nieve). El WRF es un código ligero, flexible y avanzado en un entorno informático masivamente paralelo. El WRF se mantiene y respalda como un modelo comunitario para facilitar el uso generalizado, en particular para la investigación y la enseñanza, en la comunidad universitaria. Es adecuado para usar en un amplio espectro de aplicaciones en escalas que van desde metros hasta miles de kilómetros. Dichas aplicaciones incluyen predicción meteorológica numérica de investigación y operativa (NWP), asimilación de datos e investigación de física parametrizada, simulaciones climáticas descendentes, modelos de calidad del aire de conducción, acoplamiento atmósfera-océano y simulaciones idealizadas (por ejemplo, remolinos de capa límite, convección, ondas baroclínicas)(Skamarock et al., 2005).

2.2.3 Interpolación Kriging ordinario.

Kriging ordinario es un método de interpolación basado auto correlación espacial de las variables. Este método es lineal y busca generar superficies continuas partiendo de puntos discretos, asume que la media es constante y que las variables son estacionarias y no presentan tendencias. Es el método más ampliamente utilizado en los problemas ambientales (Villatoro et al., 2008).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Materiales

3.1.1 Descripción del área de estudio

Este estudio se lo realizo en el Ecuador continental, el cual está ubicado sobre la línea ecuatorial, en América del Sur entre las latitudes $01^{\circ} 20' N$ y $05^{\circ} S$, por lo cual su territorio se encuentra en ambos hemisferios. Limita al norte con Colombia y al sur y al este con Perú. Al oeste con el Océano Pacífico. El Ecuador posee un conjunto de islas denominadas Galápagos que se encuentran ubicadas a 1000 km del Ecuador continental y conforman la región insular, sin embargo, esta región no será considerada para este estudio. La extensión del país es de 256.370 kilómetros cuadrados. El Ecuador continental comprende 3 regiones naturales:

La REGION COSTANERA abarca una faja litoral de aproximadamente 100 Km.

La REGION ANDINA está caracterizada por una barrera montañosa de la cordillera de los Andes.

La REGION ORIENTAL o cuenca amazónica comprende dos partes: - La zona sub andina, paralela a los Andes, donde se encuentra de Norte a Sur una cordillera meridiana de aproximadamente 50 Km de ancho y hacia el Este, la llanura amazónica con una altura menor a los 300 m constituida por grandes valles aluviales en parte pantanoso (Naranjo, 1981).

Ecuador tiene una población aproximada de 16.5 millones, de los cuales el 60% se dedica la agricultura principalmente de banano, flores, cacao y frutales en general. El Ecuador es uno de los 10 países que mayor cantidad de banano exportan a nivel mundial con un porcentaje del 30% aproximadamente del producto alrededor del planeta (Martínez ., et al 2007). El banano es principalmente cultivado en las provincias del Guayas y El Oro. El incremento de la variabilidad interanual de las precipitaciones podría generar pérdidas en los sectores agrícolas del país, debido al aumento de probabilidades de sequía y la precedente necesidad de implementar medidas de mitigación.

El Ecuador posee un elevado potencial para la generación hidroeléctrica. En los últimos años se han realizado proyectos hidroeléctricos emblemáticos como son Coca codo Sinclair, Sopladora, Manduriaco, Toachi Pilatón entre otros. Estos proyectos han



aumentado considerablemente la generación hidroeléctrica llegando a ser aproximadamente el 53% de energía que demanda el país (A. C. Avilés, 2009). Sin embargo, la generación hidroeléctrica está sujeta a condiciones ambientales, más concretamente las precipitaciones, lo cual evidencia una necesidad de realizar estudios sobre el desarrollo del clima.

El clima del Ecuador es muy variado. Esta variabilidad se debe a la influencia de la cordillera de los Andes la cual divide al país en las zonas mencionadas además presenta solamente 2 estaciones ligeramente marcadas que son la época seca y la húmeda (Naranjo, 1981).

La temperatura del Ecuador oscila alrededor de los 26°C mientras en la sierra dependiendo de la altura de la ciudad se encuentra entre los 6 a 22 °C. La estación húmeda se extiende entre diciembre y mayo en la costa, entre noviembre a abril en la sierra y de enero a septiembre en la Amazonía (Naranjo, 1981).

El clima del Ecuador es influenciado principalmente por 4 factores que son: corriente fría de Humboldt, la corriente cálida de “El niño”, la cordillera de los Andes y la cuenca del Amazonas. Debido a estas influencias climáticas presenta una marcada variabilidad espacio-temporal de precipitación y temperatura (Cruz, 1983).



Tabla 2: Estaciones consideradas en este estudio.

Nro	NOMBRE DE LA ESTACIÓN	DATUM: WGS 84		ALTITUD (msnm)	Nro	OMBRE DE LA ESTACIÓ	ALTITUD	
		LATITUD	LONGITUD				LATITUD	LONGITUD
1	INGUINCHO	0G 15' 30" N	78G 24' 3" W	3140	31	YARUQUI INAMHI	0G 9' 35" S	78G 18' 55" W
2	LA TOLA	0G 13' 46" S	78G 22' 0" W	2480	32	CANAL 10 TV.	0G 9' 53" S	78G 31' 21" W
3	RUMIPAMBA-SALCEDO	1G 1' 12" S	78G 35' 41" W	2685	33	NONO	0G 4' 24" S	78G 34' 22" W
4	PICHILINGUE	1G 4' 28" S	79G 29' 35" W	81	34	LAS PAMPAS	0G 25' 32" S	78G 57' 54" W
5	NUEVO ROCAFUERTE	0G 55' 0" S	75G 25' 0" W	265	35	SIGCHOS	0G 41' 58" S	78G 53' 25" W
6	PUYO	1G 30' 27" S	77G 56' 38" W	960	36	LORETO PEDREGAL	0G 33' 41" S	78G 25' 35" W
7	QUITO INAMHI-INNAQUITO	0G 10' 0" S	78G 29' 0" W	2789	37	CUSUBAMBA	1G 4' 17" S	78G 42' 10" W
8	LA CONCORDIA	0G 1' 29" N	79G 22' 49" W	244	38	PILAHUIN	1G 18' 6" S	78G 43' 56" W
9	PUERTO ILA	0G 28' 34" S	79G 20' 20" W	319	39	TISALEO	1G 20' 54" S	78G 40' 13" W
10	CAÑAR	2G 33' 7" S	78G 56' 43" W	3083	40	HUAMBALO	1G 23' 14" S	78G 31' 39" W
11	LA ARGELIA-LOJA	4G 2' 11" S	79G 12' 4" W	2160	41	SAN JUAN-CHIMBORAZO	1G 37' 35" S	78G 47' 0" W
12	SANGAY(P.SANTA ANA)	1G 41' 18" S	77G 57' 31" W	880	42	GUANO	1G 36' 33" S	78G 38' 7" W
13	BABAHOMO-UTB	1G 47' 49" S	79G 32' 0" W	7	43	CHANIN	2G 40' 13" S	78G 44' 50" W
14	OTAVALO	0G 14' 36" N	78G 15' 0" W	2550	44	PISCICOLA CHIRIMICHA	2G 46' 28" S	79G 10' 20" W
15	EL CORAZON	1G 8' 2" S	79G 4' 32" W	1471	45	CUMBE	3G 4' 58" S	79G 0' 46" W
16	PEDRO FERMIN CEVALLOS(CO	1G 21' 9" S	78G 36' 54" W	2910	46	GIRON	3G 9' 14" S	79G 8' 58" W
17	CHILLANES	1G 58' 32" S	79G 3' 48" W	2330	47	SIGSIG INAMHI	3G 2' 54" S	78G 47' 10" W
18	GUALACEO	2G 52' 55" S	78G 46' 35" W	2230	48	RICAURTE-CUENCA	2G 51' 3" S	78G 56' 55" W
19	EL LABRADO	2G 43' 58" S	79G 4' 23" W	3335	49	SAYAUSI(MATADERO DJ.	2G 52' 37" S	79G 4' 13" W
20	YANGANA	4G 22' 5" S	79G 10' 29" W	1835	50	SURUCUCHO(LLULLUCHI	2G 49' 34" S	79G 7' 54" W
21	ZARUMA	3G 41' 56" S	79G 36' 41" W	1100	51	SAN LUCAS INAMHI	3G 43' 55" S	79G 15' 41" W
22	GUALAQUIZA INAMHI	3G 23' 53" S	78G 34' 33" W	851	52	SOZORANGA INAMHI	4G 19' 29" S	79G 47' 20" W
23	FF CC CARCHI	0G 36' 30" N	78G 8' 11" W	1280	53	CHORRILLOS	1G 3' 15" S	80G 41' 20" W
24	TUFINNO	0G 48' 3" N	77G 51' 18" W	3418	54	PUERTO CAYO	1G 21' 10" S	80G 44' 15" W
25	PABLO ARENAS	0G 30' 8" N	78G 11' 34" W	2340	55	USHCURRUMI	3G 19' 16" S	79G 35' 0" W
26	AMBUQUI	0G 25' 34" N	78G 0' 28" W	1880	56	LOGRONNO	2G 37' 28" S	78G 12' 6" W
27	PIMAMPIRO	0G 23' 23" N	77G 56' 28" W	2090	57	EL PANGUI	3G 55' 59" S	78G 40' 29" W
28	SAN FRANCISCO DE SIGSIPAM	0G 17' 53" N	77G 54' 42" W	2230	58	CAJANUMA	4G 4' 50" S	79G 12' 19" W
29	SELVA ALEGRE-IMBABURA	0G 14' 47" N	78G 34' 37" W	1800	59	MILAGRO(INGENIO VALE	2G 8' 1" S	79G 36' 1" W
30	LA CHORRERA	0G 12' 6" S	78G 32' 6" W	3165	60	PUERTO INCA(CANNAR E	2G 31' 49" S	79G 32' 38" W

Fuente: INAMHI, 2015

Ubicación geográfica de las estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio

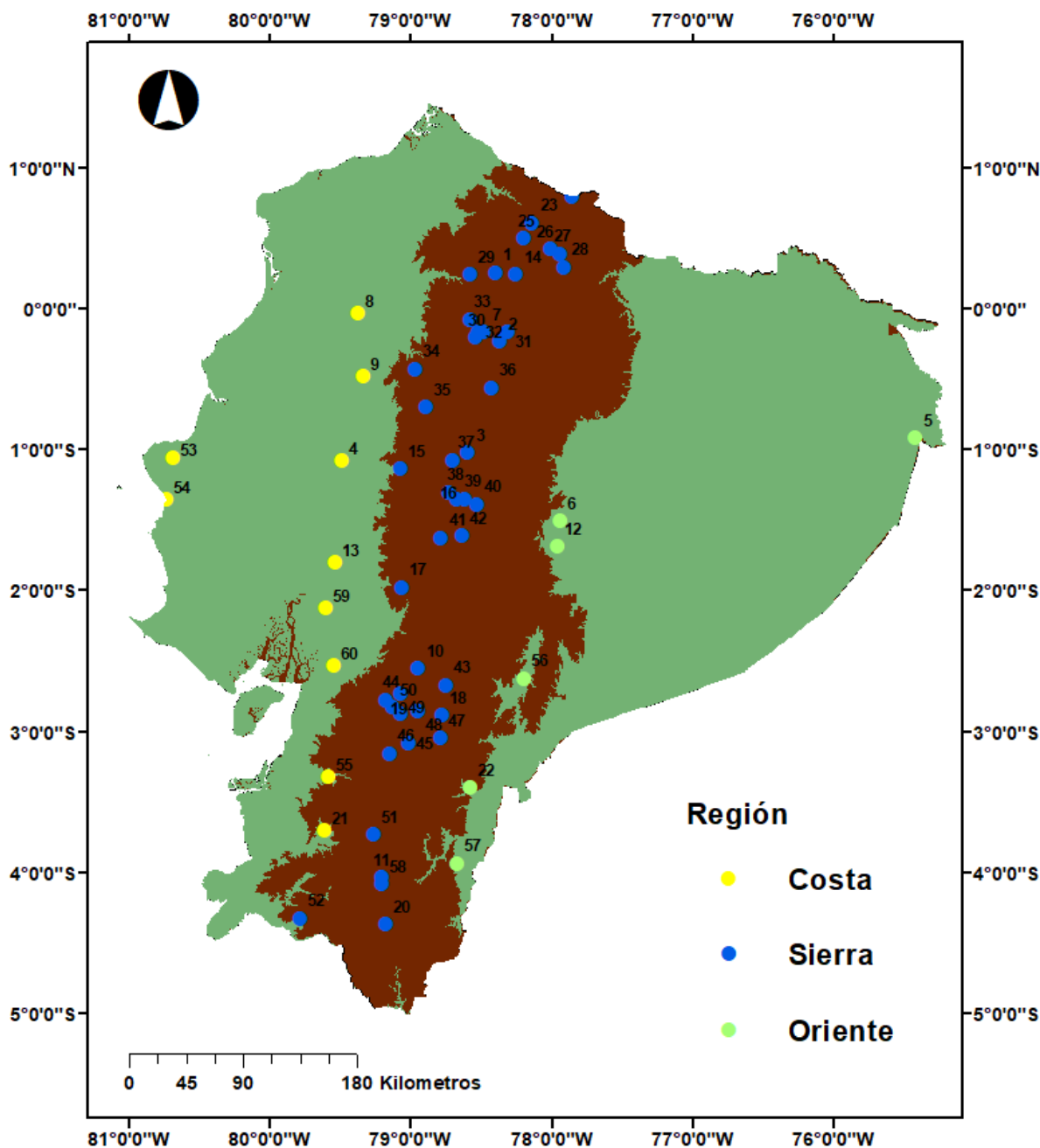


Figura 1: Ubicación geográfica de estaciones meteorológicas, Datum WGS 84 y escala 1:1000000.

Fuente: (“Cartografía de libre acceso (Escala Nacional) – Geoportal Ecuador,” 2015.)

3.1.2 Datos de las observaciones

Los datos de las observaciones son acumulados mensuales de precipitación de 172 estaciones pluviométricas ubicadas en distintas localidades del Ecuador, mismas que fueron otorgados por el INAMHI. Los datos pertenecen a un periodo de 30 años, desde enero 1981- diciembre 2010. De esta información se hizo control de calidad quedando un total de 60 estaciones que se pueden apreciar en la tabla 2 y en la figura 1. Sin embargo, para la realización de proyecciones de sequía fue usado el periodo 1981-2005 debido a que los modelos GCMs únicamente disponían de datos históricos hasta el año 2005 para el Ecuador. Para el análisis de índices se utilizó la serie temporal completa de todas las estaciones es decir el periodo (1981-2010)

3.1.3 Datos de los modelos climáticos globales.

Para este estudio se consideraron 3 modelos globales obtenidos de la tercera comunicación nacional de cambio climático (TCN), mismos que son producto de la fase 5 de intercomparación de modelos acoplados, entre los cuales están CSIRO-Mk3, GISS-E2-R, IPSL-CM5A-MR en el periodo histórico de 1981-2005 y de los mismos modelos en el periodo futuro 2041-2070 para los escenarios de emisiones medias RCP 4,5 y emisiones altas RCP 8,5. Los datos que presentan estos modelos son acumulados mensuales de precipitación tanto para el periodo pasado como futuro.

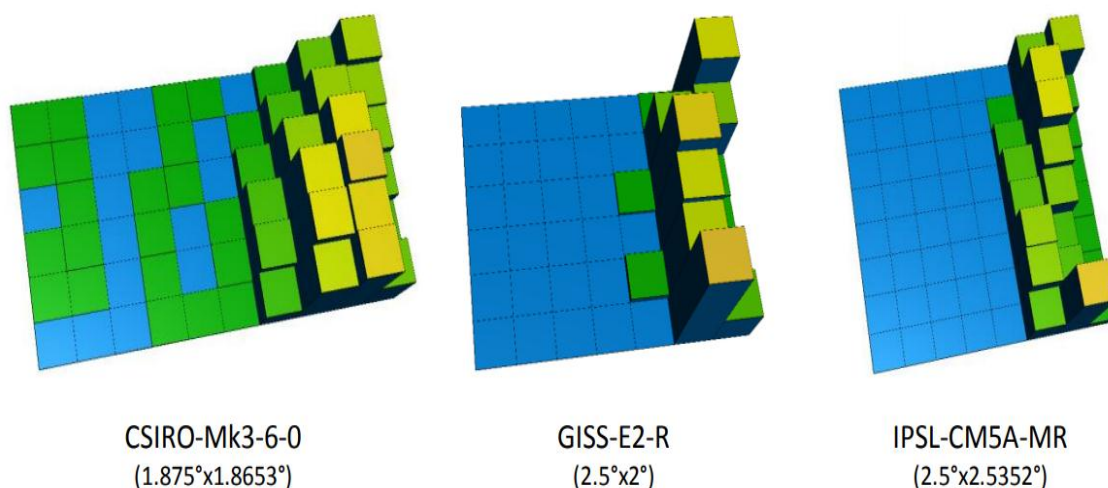


Figura 2: Representación espacial del Ecuador de tres modelos globales del CMIP5 utilizados en la TCN.

Fuente: (Armenta, Villa, & Jácome, 2016)

3.1.4 Datos de los modelos regionales de clima.

Los modelos GCMs CSIRO-Mk3, GISS-E2-R, IPSL-CM5A-MR fueron sometidos a una disminución de escala dinámica del periodo base 1981-2005 y del periodo futuro 2041-2070 en sus 2 escenarios RCP (4,5 y 8,5) de series de precipitación a una resolución espacial de 10 km y una resolución temporal de 6 horas propiciados por el proyecto MAE-TNC. Esta reducción de escala dinámica realizada con el modelo regional dinámico WRF en su versión 3.6.1 en modo climático. Las condiciones iniciales y de frontera son la de los GCMs y las variables de entrada fueron; componente zonal del viento, componente meridional del viento, temperatura del aire, humedad específica, temperatura superficial del mar, presión en superficie, presión a nivel medio del mar.

Los siguiente parametrización fue utilizada:

Microfísica: WSM 3-class simple ice.

Radiación Onda Corta: rrtm

Radiación Onda Larga: Dudhia.

Capa superficial: Monin-Obukhov.

Superficie: Unified Noah land-surface model.

Capa límite: YSU (Yonsei University).

Cúmulus: Kain-Fritsch (new Eta).

3.2 Métodos

3.2.1 Control de calidad y homogeneidad de observaciones.

El primer paso fue realizar un control de calidad a las observaciones. Para tomar una estación como válida se permitió hasta un 10% de datos faltantes, lo recomendado por la literatura es 5% pero por la falta de información de la zona de estudio se amplió el rango para obtener mayor información. La identificación de datos atípicos (outliers) se consideraron 2 rangos intercuartílicos como lo recomendado por (Campozano et al ., 2015).

$$Q_1 - 3(Q_3 - Q_1) \leq x \leq Q_3 + 3(Q_3 - Q_1) \quad (1)$$

Donde:

Q_1 = *primer cuartil o 25 percentil*,

Q_3 = *tercer cuartil o 75 percentil*.

Posteriormente los datos fueron sometidos a un análisis de homogeneidad con el software RHtestsV4 para comprobar que las variaciones fueran únicamente producto del clima y no por factores externos. Para tomar una estación como válida esta no debía de tener más de 3 saltos significativos en la serie (Wang & Feng, 2010), después de este análisis quedaron 60 estaciones que cumplían con los criterios de calidad como se puede observar en el capítulo VII (anexos). Finalmente se realizó el relleno de datos faltantes con la rutina de datos especificada por (Ureña Mora et al., 2016) la cual utiliza la combinación de 2 métodos, un método autoregresivo se usa como primera aproximación de estimación que luego es usado de forma iterativa por el método de componentes principales usando la matriz de correlación de una misma variable.

La extracción de las series de tiempo se las realizó para las 60 estaciones y se tomó el punto de grilla más cercano para los 3 modelos considerados Csiro, Giss e Ipsl y se extrajo las series tanto para el periodo base (1981-2005) como el futuro (2041-2070) en sus 2 escenarios. Este mismo procedimiento fue realizado para la extracción de las series de tiempo del modelo WRF en presente y futuro.

3.2.2 Análisis de índices de sequía en el Ecuador y formulación de los índices.

3.2.3 Índice de precipitación estandarizado (SPI).

El índice de precipitación estandarizado es uno de los índices más usados en la actualidad por su robustez y versatilidad para el monitoreo de sequias (Dogan et al., 2012).

El SPI es un número adimensional el cual representa teóricamente el número de desviaciones estándar por encima o por debajo de la media del promedio climatológico de un valor de precipitación de un lugar definido. El SPI es ampliamente calculado y aceptado en todo el globo de modo operacional y para la investigación debido a su

estandarización en tiempo y escala, lo cual permite la comparación de lugares con características distintas. (Morid et al., 2006)

Este índice puede ser calculado para un elevado número de escalas en el tiempo lo cual permite la identificación de sequías en escalas de tiempo cortas las cuales afectan principalmente a la agricultura y ganadería mediante la disminución de la humedad del suelo. Al mismo tiempo se puede calcular a escalas de tiempo más largas la cuales permiten identificar déficits hídricos principalmente en escorrentías superficiales en los ríos y en los reservorios de agua. En algunos casos se puede tener condiciones húmedas en una escala temporal y secas en otras al mismo tiempo (Rivera, 2014).

La obtención de SPI se detalla a continuación:
(Mishra & Desai, 2005) determino la función de probabilidad gama de la siguiente manera:

$$G(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} \quad (2)$$

Donde $x > 0$, x es la variable de precipitación; β es un parámetro de escala que determina la distribución de los valores a lo largo del eje x , $\beta > 0$; α es el parámetro de forma de la curva, $\alpha > 0$ determina el grado de sesgo de la distribución, y $\Gamma(\alpha)$ es la función gamma la cual está descrita a continuación:

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty y^{\alpha-1} e^{-y} dy \quad (3)$$

Los parámetros α y β para la función gamma se calcula para cada escala de tiempo de acuerdo al interés que se tenga, en este caso: 1, 3, 6, 9, 12 y 24 meses. Edwards & Mckee (1997) sugieren la estimación de estos parámetros mediante el método de máxima verosimilitud (Thom, 1958) mediante las ecuaciones:

$$\hat{\alpha} = \frac{1}{4A} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right) \quad (4)$$

$$\hat{\beta} = \frac{\bar{\bar{x}}}{\hat{\alpha}} \quad (5)$$

En el cual n es el número de observaciones y A es igual a:

$$A = \ln(\overline{x}) - \frac{\sum \ln(x)}{n} \quad (6)$$

La integración de la función de densidad de probabilidades con respecto a x se la realiza haciendo uso los parámetros α y β , se consigue una expresión de probabilidad acumulada $G(x)$ de una cantidad de precipitación dada que ocurre en un determinado mes y para cada escala de tiempo de interés. La probabilidad acumulada se expresa como.

$$G(x) = \int_0^x g(x)dx = \frac{1}{\hat{\beta}\hat{\alpha}\Gamma(\hat{\alpha})} \int_0^x x^{\hat{\alpha}-1} e^{-x/\hat{\beta}} dx \quad (7)$$

La distribución gamma no está definida para valores de $x=0$, esto genera problemas ya que en las series de datos hay meses donde no se registran precipitaciones. Para evitar esto se utilizó el estadístico $H(x)$ para definir la probabilidad acumulada.

$$H(x) = u + (1 - u) G(x) \quad (8)$$

Donde u es la probabilidad de que ocurra una precipitación de cero, $1 - u$ es la probabilidad de que no ocurra precipitación nula. La probabilidad acumulada $H(x)$, se transforma en la probabilidad normal estándar Z con una media de cero y varianza 1, que es el valor del SPI. Con el objetivo de facilitar la obtención de los Índices de McKee, los valores de Z se los puede calcular mediante una conversión aproximada, que utiliza las fórmulas 8 y 9, que convierten la probabilidad acumulada gamma a un valor de probabilidad estándar normal o variable Z (Abramowitz & Stegun, 1965; Edwards & McKee, 1997; Hughes & Saunders, 2002).

$$Z = SPI = - \left(k - \frac{c_0 + c_1 k + c_2 k}{1 + d_1 + d_2 k^2 + d_3 k^2} \right) \quad (9)$$

Para $0 < H(x) \leq 0.5$

$$Z = SPI = + \left(k - \frac{c_0 + c_1 k + c_2 k}{1 + d_1 + d_2 k^2 + d_2 k^2} \right) \quad (10)$$

Para $0.5 < H(x) \leq 1$

Dónde:

$$K = \sqrt{\ln \left[\frac{1}{(H(x))^2} \right]} \quad \text{Para } 0 < H(x) \leq 0.5 \quad (11)$$

$$K = \sqrt{\ln \left[\frac{1}{(1 - H(x))^2} \right]} \quad \text{Para } 0.5 < H(x) < 1 \quad (12)$$

Según la aproximación de Abramowitz & Stegun (1965) los valores de las constantes son:

$c_0 = 2.515517$, $c_1 = 0.802853$, $c_2 = 0.010328$, $d_1 = 1.432788$, $d_2 = 0.189269$, $d_3 = 0.001308$

3.2.4 Porcentaje de precipitación normal (PPN).

El porcentaje de precipitación normal es la medida más directa del desvío de la media de su promedio a largo plazo en porcentaje (Morid et al., 2006).

Las principales ventajas de este índice es su fácil entendimiento para público en general, su sencilla manera de cálculo, el número de escalas temporales al que puede ser calculado y la flexibilidad de permitir datos faltantes.

Para calcular el PPN se requiere el valor promedio para el periodo de tiempo considerado (X_m). Se procede a dividir el valor de precipitación (X_i) para el promedio y se multiplica por cien a fin de tenerlo en porcentaje.

$$PPN = \frac{x_i}{x_m} 100 \quad (13)$$

Un valor de precipitación se considera normal cuando es 100. Una de sus desventajas es que el valor del promedio de precipitación suele diferir de la media en el 50% de las veces, debido a que los valores de precipitación en escalas de tiempo cortas no presentan distribución normal. Es difícil ligar un valor de desvío de la precipitación con un impacto específico. Esto limita los planes de mitigación basados en desviaciones respecto a la desviación normal (Wilhite et al., 2000).

3.2.5 Z-Score.

El cálculo del Z-Score se lo realiza mediante la diferencia entre un valor de precipitación (x_i) menos la media (x_m) dividido para la desviación estándar σ .

$$Z - Score = \frac{(x_i - x_m)}{\sigma} \quad (14)$$

El Z-Score representa un número adimensional, el mismo indica la cantidad de desviaciones estándar por encima o por debajo de la media de un valor de precipitación. Una de las principales ventajas del Z-Score frente al SPI es su simplicidad de cálculo y que permite datos faltantes (Wu et al., 2001). Esto es muy importante en regiones donde no se tenga un adecuado registro de los datos y los mismos puedan estar incompletos.

Algunos autores han llegado a confundir SPI con Z-Score. Sin embargo, el Z-score no se ajusta a una distribución de probabilidades por lo que se especula que no identifica de manera adecuada las sequías en periodos de tiempo cortos (Dogan et al., 2012).

3.2.6 Índice de deciles (ID).

Este índice se usa de manera operativa en Australia y Sudáfrica dado que es simple de calcular y esta normalizado lo cual permite la comparación espacialmente de estaciones meteorológicas. Para calcular el ID se ordena los datos de menor a mayor a fin de tener

una distribución de frecuencias acumuladas. Luego esta es dividida en partes o deciles. De esta forma el primer decil representa los valores que no exceden el 10% de precipitación en el registro; el segundo decil es registro de precipitación no excedido el 20% de los datos y así sucesivamente (Morid et al., 2006)

Generalmente los deciles son agrupados en 5 clases, 2 clases por grupo. Sin embargo en este estudio se usó la categorización propuesta por Morid et al., 2006 quienes unifican los valores cercanos a lo normal en una única categoría.

3.2.7 Criterios de comparación.

El cálculo de los índices se lo realizó usando el periodo 1981-2010. Posteriormente al cálculo de los índices se procedió a clasificar las estaciones pluviométricas por la región climatológica en la que se encontraban y finalmente se procedió a comparar los mismos respecto al SPI, esto se lo realizó mediante la diferencia de frecuencias del promedio de SE, SS, SM, en cada región del Ecuador. Se realizó gráficos de barras agrupadas para poder identificar el comportamiento de los índices respecto al SPI en las regiones costa sierra y oriente. Posteriormente se realizó mapas donde se interpolo mediante Kriggin ordinario el valor de la diferencia de cada estación para valorar su comportamiento espacial en el Ecuador.

Tabla 2: *Categoría de SPI, Z-Score, ID, PPN*

Categoría	SPI, Z-Score	ID (%)	PPN (%)
Normal	-0.99 a 0.99	30 a 70	80 a 100
Sequía moderada	-1.49 a -1.00	20 a 30	55 a 85
Sequía severa	-1.99 a -1.50	10 a 20	40 a 55
Sequía extrema	≤ -2.00	≤ 10	≤ 40

Fuente: (Morid et al., 2006)

3.2.8 Proyecciones futuras de sequía.

Para este análisis lo primero que se realizó fue identificar las frecuencias relativas de SE, SS, SM en el periodo base (1981-2005) a fin de determinar qué tan acertadas son las proyecciones producidas por los modelos en la zona de estudio. Mediante este análisis se

determinó que los modelos con reducción de escala W-GCMs tienen proyecciones más apropiadas respecto a las observaciones y la habilidad en general de modelamiento se incrementa respecto a los GCMs con el método de reducción de escala dinámica WRF. Por esta razón para el análisis de proyecciones futuras de sequía se consideró adecuado únicamente utilizar datos del W-GCMs.

El SPI en escala temporal de 3 meses resultó adecuado ya que representa la escala temporal propia de una estación climática de 3 meses.

El cálculo del SPI se lo realizó usando el periodo base (1981-2005) de cada modelo respectivamente como referencia para identificar los cambios en el futuro que proyectan los distintos modelos y escenarios para el periodo 2041-2070

Para calcular el SPI para la línea base (1981-2005) y los datos proyectados (2041-2070) se realizó lo siguiente:

En primer lugar, se ajusta los eventos de precipitación a una función de probabilidad gamma independiente, que ha demostrado ser una función adecuada para la precipitación, esto se lo realiza para cada mes del año a lo largo de toda la serie de tiempo (1981-2005). Por ejemplo, para el periodo de referencia la función gamma se la generó usando los valores de 25 meses de enero de 1981 hasta 2005, y así sucesivamente.

Luego estas funciones de densidad se convirtieron en 12 funciones de densidad acumulada 1 por cada mes.

Posteriormente esta función acumulada se transformó a una distribución normal estándar esto quiere decir con media de 0 y desviación estándar de 1. El valor de SPI queda representado por su valor por encima o por debajo de la media del valor normal estándar para ese mes.

Para identificar las sequias SPI-3, mismas que ocurren cuando el valor de SPI se mantiene por debajo del umbral seleccionado para 3 meses o más. Por ejemplo, si enero se mantuvo por debajo de -1 pero luego si de enero a marzo está en 1 entonces se produciría una sequía para SPI-1 sin embargo para SPI-3 está saldría del rango de sequía.

Posteriormente se realizó gráficos de barras agrupadas y se analizó la frecuencia relativa de SE, SS, SM en el periodo base (1981-2005), para determinar su variabilidad

regional se analizó el promedio de las frecuencias relativas de todas las estaciones en cada región (costa, sierra y oriente). Finalmente, se comparó con los modelos en el periodo base y posteriormente se analizó la variabilidad en el futuro (2041-2070) para los escenarios RCP 4,5 y 8,5.

3.2.9 Evaluación de patrones temporales de sequía.

Un análisis de la variabilidad temporal de las sequías en el Ecuador permite identificar los meses que tengan un aumento o disminución del número de eventos de sequías en sus medias en regiones del Ecuador, y determinar su variabilidad respecto al periodo base, además la identificación de meses donde los eventos sequía aumentan o disminuyen con respecto a los 2 escenarios de cambio climático propuestos para este estudio, además permitirá identificar la variación estacional y efectos de cambio climático.

Para analizar la variabilidad temporal primeramente se realizó el cálculo de SPI-3. Se trabajó con frecuencias relativas de SPI de toda la serie temporal SPI en el periodo de referencia (1981-2005) de las observaciones y los modelos, es decir para obtener un valor para el mes de enero se procedió a sumar los valores SPI-3 que indicaban sequía, por ejemplo menores o iguales a -2 en los eneros de toda la serie y se procedió a dividir para 25 para obtener la frecuencia relativa y posteriormente se múltiplo por 100 a fin de tener estos valores en porcentaje, esto se realizó para todas las estaciones de la zona de estudio, pero ya que el país está dividido naturalmente en 3 regiones climatológicas se presumió conveniente realizar un análisis de frecuencia relativa regional a fin de tener tres series temporales para cada región del Ecuador y sea factible la determinación de los patrones temporales de sequía en regiones del Ecuador. Con el fin de analizar más detalladamente se identificó para cada categoría de sequía (sequía extrema, sequía severa y sequía moderada).

Este mismo procedimiento se lo realizó para los datos proyectados (2041-2070) por los modelos W-Csiro, W-Giss y W-Ipsl en los 2 escenarios considerados para este estudio RCP (4,5 y 8,5) luego se evaluó mediante gráficos el cambio en el número de eventos de sequía detectados en el siglo XX con respecto a los diferentes escenarios proyectados para mediados-finales del siglo XXI.

3.3.1 Evaluación de patrones espaciales de sequía.

El análisis de los patrones de sequía a nivel espacial permite analizar las zonas más afectadas por el cambio climático en diferentes localidades de Ecuador y evaluar sus cambios en el futuro, así como la variación de las tendencias de acuerdo a cada escenario usado para esta investigación.

Para determinar los patrones espaciales de sequía primeramente se procedió a calcular SPI-3 para el presente y futuro, luego se identificó los eventos de sequía para cada estación en el periodo base y se dividió para el número de años considerados para obtener la frecuencia relativa. Luego estos datos fueron usados para ser interpolados y se obtuvo un mapa de interpolación del Ecuador a fin de identificar los lugares que presentan mayor frecuencia de SE, SS, y SM. Este procedimiento fue realizado para las observaciones y para los modelos W-Csiro, W-Giss y W-Ipsl en el periodo base (1981-2005). Posteriormente se realizó el mismo procedimiento con los modelos W-Csiro, W-Giss y W-Ipsl en el periodo futuro (2041-2070) en los dos escenarios RCP (4,5 y 8,5) para poder identificar de manera espacial los cambios más significativos en el territorio nacional de acuerdo a cada escenario de cambio climático propuesto para este estudio.

IV. RESULTADOS

4.1 Análisis de índices de sequía.

4.1.1 Análisis de frecuencia.

El análisis de los índices se lo realizó mediante promedios para cada región del país, donde se analizaron las frecuencias absolutas de sequía extrema, sequia severa, sequia moderada y condiciones normales. Mediante este análisis se pretende evaluar los índices Z-Score, PPN e ID respecto al SPI. Para este propósito se realizó gráficos de barras para analizar la diferencia de la diferencia frecuencias absolutas en la región costa sierra y oriente.

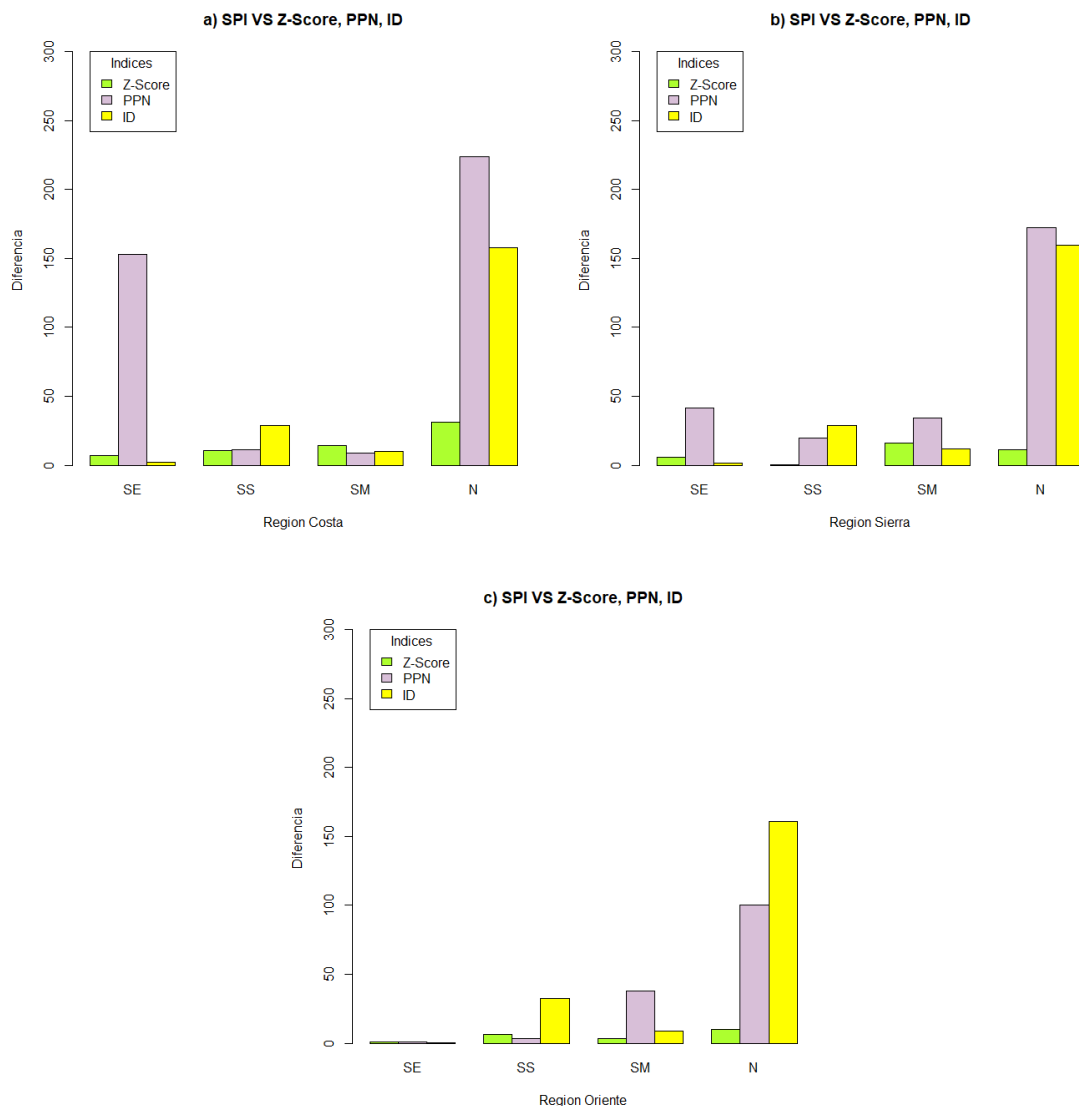


Figura 3: Frecuencia absoluta de la diferencia de SPI vs Z-Score, PPN e ID en regiones del Ecuador a escala temporal de 3 meses.

El índice que mejor cuantifica los eventos de sequía extrema y moderada en las 3 regiones del Ecuador respecto al SPI es el ID; el PPN presenta algunas falencias con una sobreestimación de los eventos de sequía extrema principalmente en la costa, en el oriente se puede apreciar que la categorización propuesta por Morid., et al 2006 se comporta un poco mejor. El Z-Score parece tener una subestimación de eventos de sequía extrema presumiblemente por no estar ajustado a una distribución normal, diferencia que se reduce con el aumento de escala temporal y parece comportarse de manera aceptable en las 3 regiones del Ecuador (figura3).

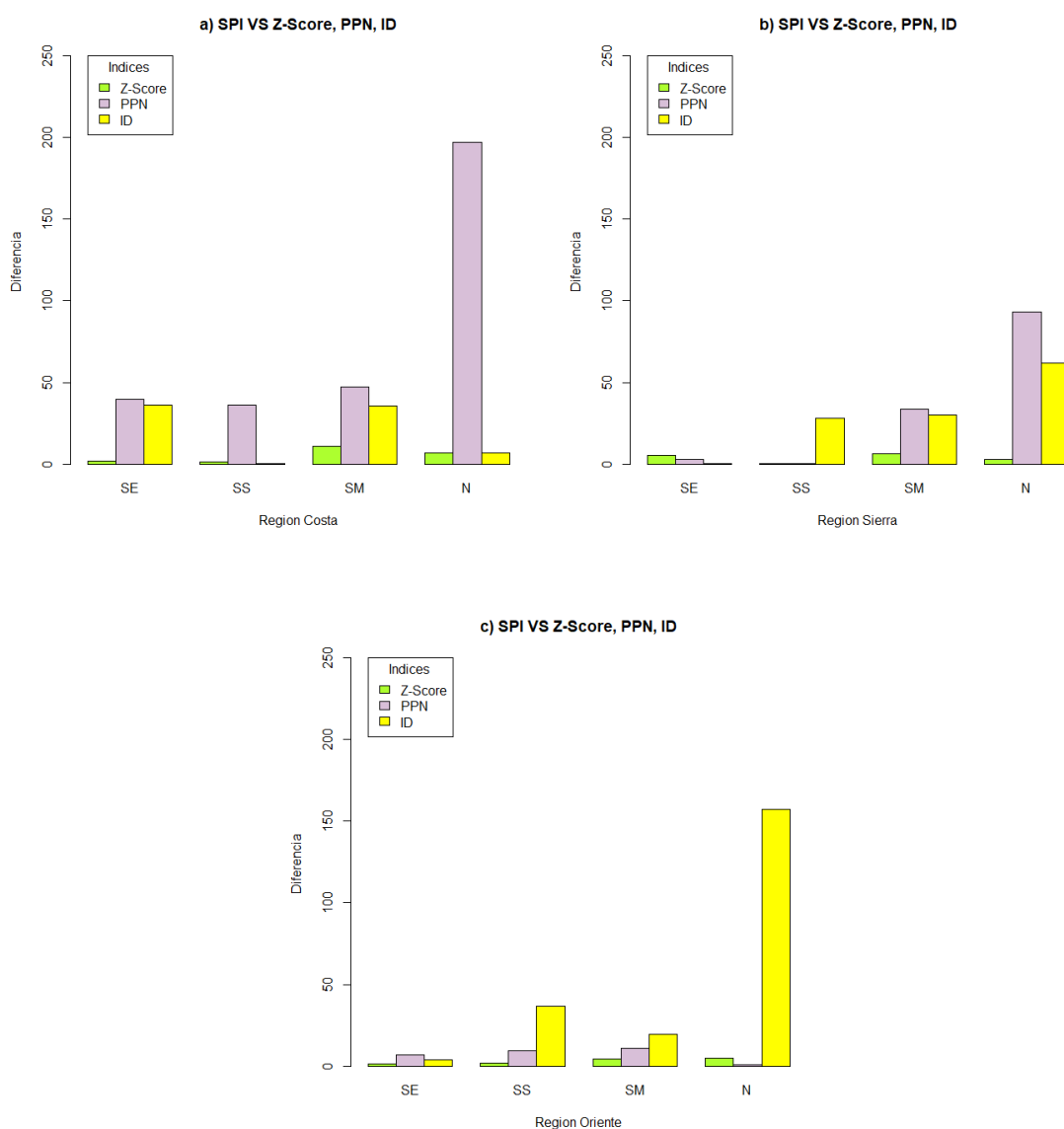


Figura 4: Frecuencia absoluta de la diferencia de SPI vs Z-Score, PPN e ID en regiones del Ecuador a escala temporal de 9 meses.

En la escala temporal de 9 meses el Z-Score se comporta de mejor manera respecto al SPI en todas las categorías de sequía y en todas las regiones del Ecuador, el ID presenta sobrestimaciones respecto al SPI principalmente en la región costa, en la sierra y el oriente se aprecia mejoría. El PPN respecto al SPI es el índice que presenta mayores sobrestimaciones; sin embargo, los resultados parecen ser aceptables en el oriente (figura 4).

4.1.2 Análisis espacial de índices de sequía.

El análisis espacial de los índices permitió identificar lugares en los que los índices se comportan mejor respecto al SPI. En la figura 5 y 6 se muestra que:

El índice Z-Score muestra un funcionamiento bastante aceptable en todo el país, y presenta una mejoría cuando se lo calcula a escalas más grandes, sin embargo, muestra algunas sobrestimaciones y subestimaciones en la región costa-norte del país.

La clasificación ID propuesta por Morid, et al 2006 indica que puede ser considerado adecuado para el monitoreo de sequía extrema y sequía moderada en todo el país, en las sequía severa y condiciones normales presenta subestimaciones y sobrestimaciones en todo el Ecuador.

El PPN a escala de 3 meses presenta subestimaciones y sobrestimación en la mayoría del Ecuador de las 3 categorías de sequía y para la escala temporal de 9 meses parece acentuarse más esta tendencia como se observa en la figura 5 y 6.

Diferencia de SPI vs Z-Score, ID y PPN a escala de 3 meses

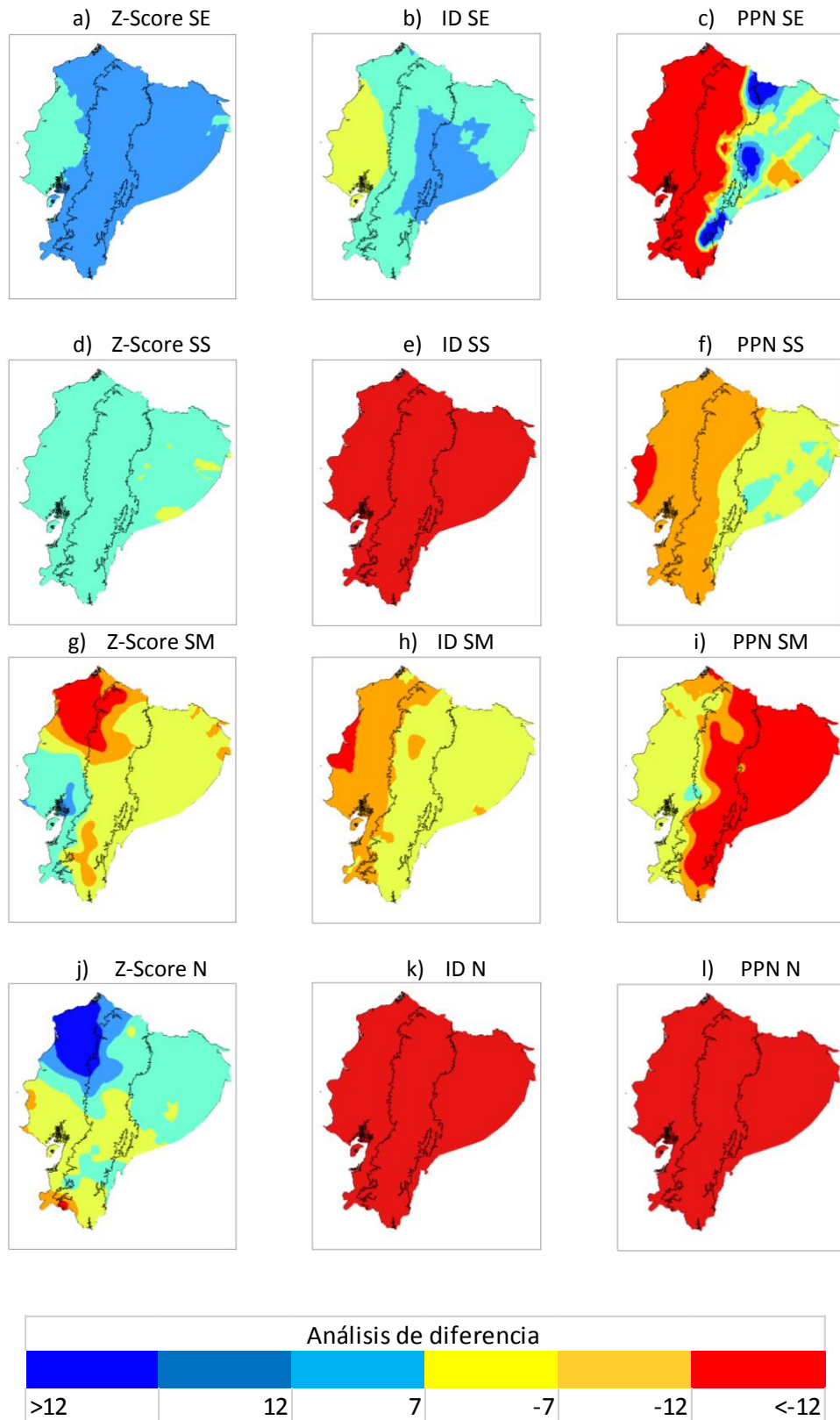


Figura 5: Representación espacial de la diferencia de SPI vs Z-Score(a,d,g,j), ID(b,e,h,k), PPN(c,f,i,l) en el Ecuador a escala de 3 meses.

Diferencia de SPI vs Z-Score, ID y PPN a escala de 9 meses

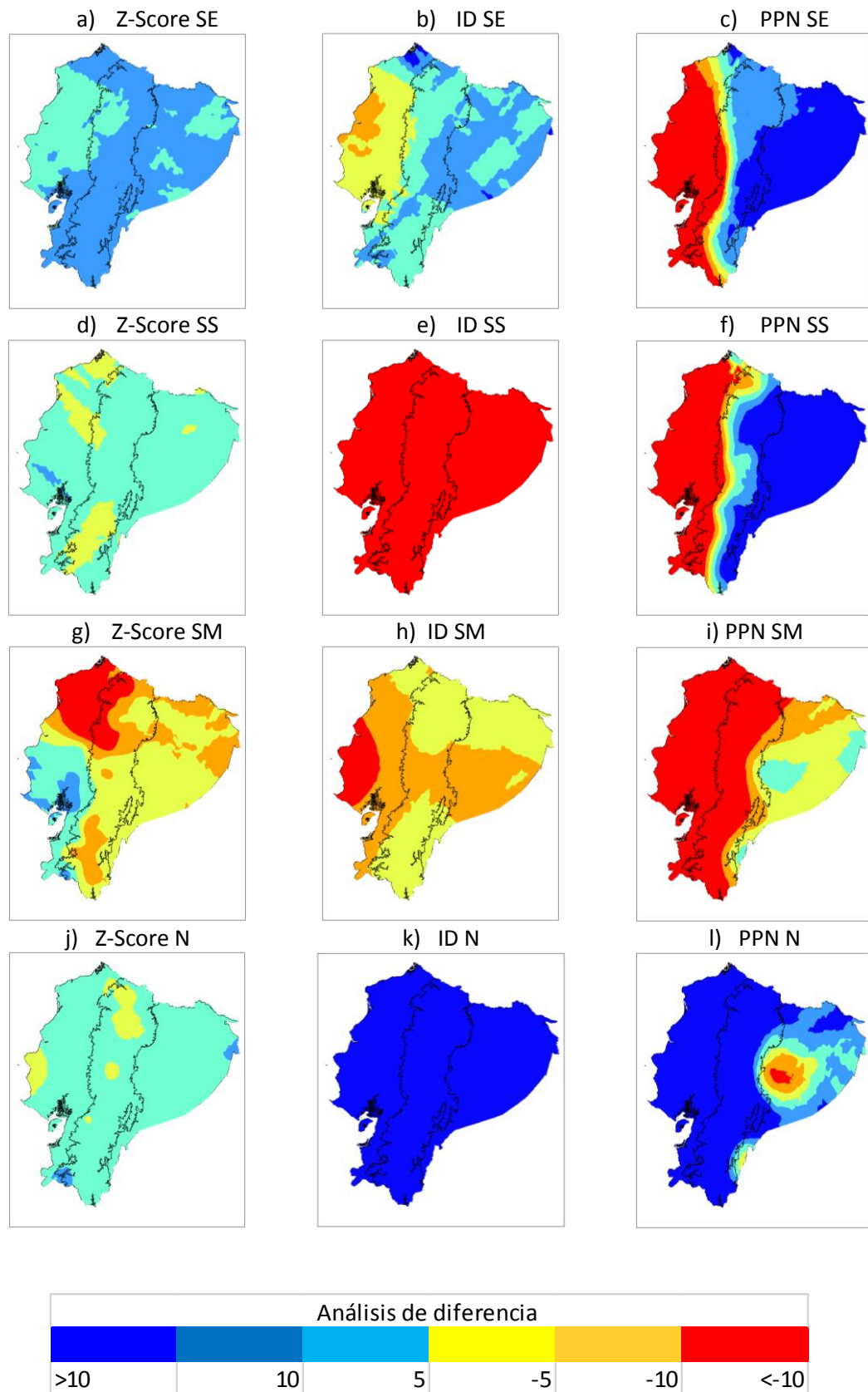


Figura 6: Representación espacial de la diferencia de SPI vs Z-Score(a,d,g,j), ID(b,e,h,k), PPN(c,f,i,l) en el Ecuador a escala de 9 meses.

4.2 Proyecciones futuras de sequía.

4.2.1 Análisis de los modelos en el periodo base.

En la sección 4.2.1 se presenta el análisis de los modelos GCMs y W-GCMs en las categorías de SE, SS y SM con respecto a las observaciones como se puede evidenciar en la figuras 7, 8 y 9.

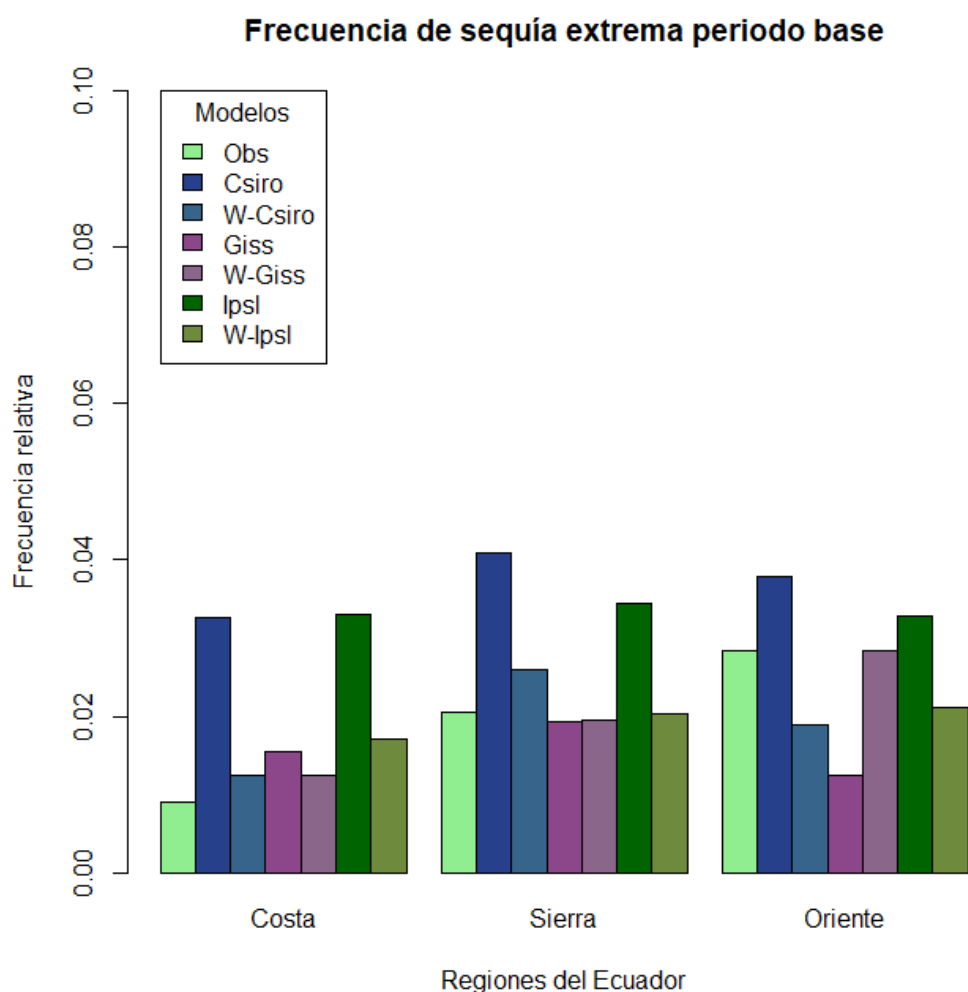


Figura 7: Frecuencia relativa de sequía extrema en regiones del Ecuador de Obs, GCMs y W-GCMs en el periodo base (1981-2005).

Se puede apreciar en la figura 7 un histograma de frecuencias. En la costa se identifica sobrestimación por parte del modelo Csiro e Ipsi de manera pronunciada, y el modelo Giss presenta la menor sobrestimación en la región costa. Los modelos con reducción de escala en la región costa indican frecuencias más cercanas a las observaciones por parte los modelos W-Csiro, W-Giss, el modelo W-Ipsi presenta una sobrestimación mayor

respecto a los otros 2 modelos. En la sierra los modelos Csiro e Ipsl presentan sobrestimaciones respecto al periodo base, el modelo Giss presenta una frecuencia muy cercana a las observadas. Los modelos con reducción de escala en la sierra presentan una frecuencia de sequía extrema más apegada a las observaciones con una sobrestimación ligera por parte del modelo W-Csiro, subestimación del modelo W-Giss y el modelo W-Ipsl presenta resultados más apegados a los observados. En la región oriente se puede observar sobrestimaciones por parte del modelo Csiro e Ipsl, el modelo Giss presenta subestimación. Los modelos con reducción de escala W-Csiro y W-Ipsl presenta subestimaciones, el modelo W-Giss presenta frecuencias muy apegadas

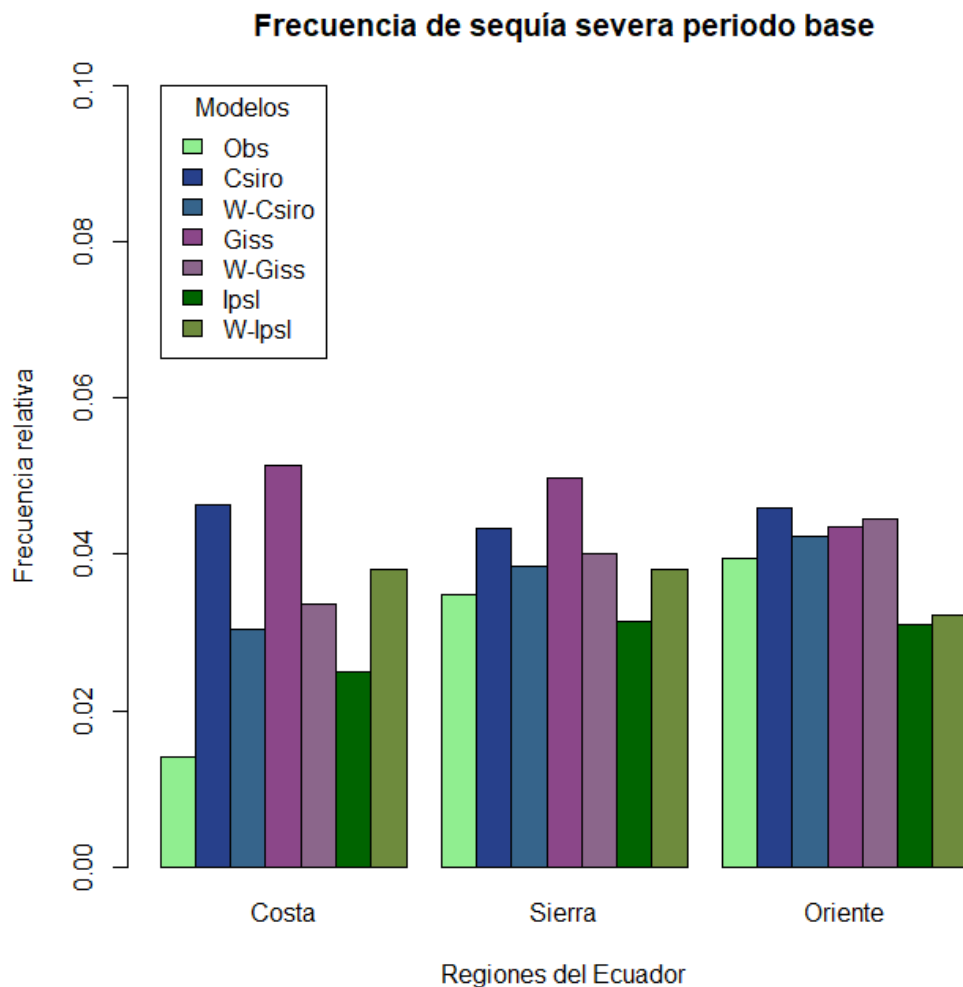


Figura 8: Frecuencia relativa de sequía severa en regiones del Ecuador de Obs, GCMs y W-GCMs en el periodo base (1981-2005).

La grafica 8 presenta una sobrestimación de sequias en la región costa de manera muy pronunciada respecto a las observaciones por parte de los modelos Csiro y Giss, el modelo Ipsl presenta frecuencia más apegada a las observaciones. En la región costa los modelos

W-Csiro y W-Giss presentan sobrestimación siendo esta menor a la de sus respectivos GCMs, el modelo Ipsl presenta un aumento de sobrestimación respecto a su GCM. En la región sierra los modelos Csiro y Giss presentan sobrestimaciones, y el modelo Ipsl presenta leve subestimación. Los modelos con reducción de escala W-Csiro y W-Giss presentan una sobrestimación más leve respecto a sus GCMs, presentando frecuencias cercanas a las observadas, el modelo W-Ipsl presenta una leve sobrestimación. En la región oriente el modelo Csiro e Ipsl presentan sobrestimaciones leves respecto a las observaciones y el modelo Ipsl presenta una subestimación moderada. El modelo con reducción escala W-Csiro presenta una sobrestimación más leve que su GCM, el modelo W-Giss presenta un ligero aumento de sobrestimación respecto a su GCM y el modelo W-Ipsl presenta una leve mejoría de frecuencia respecto a su GCM.

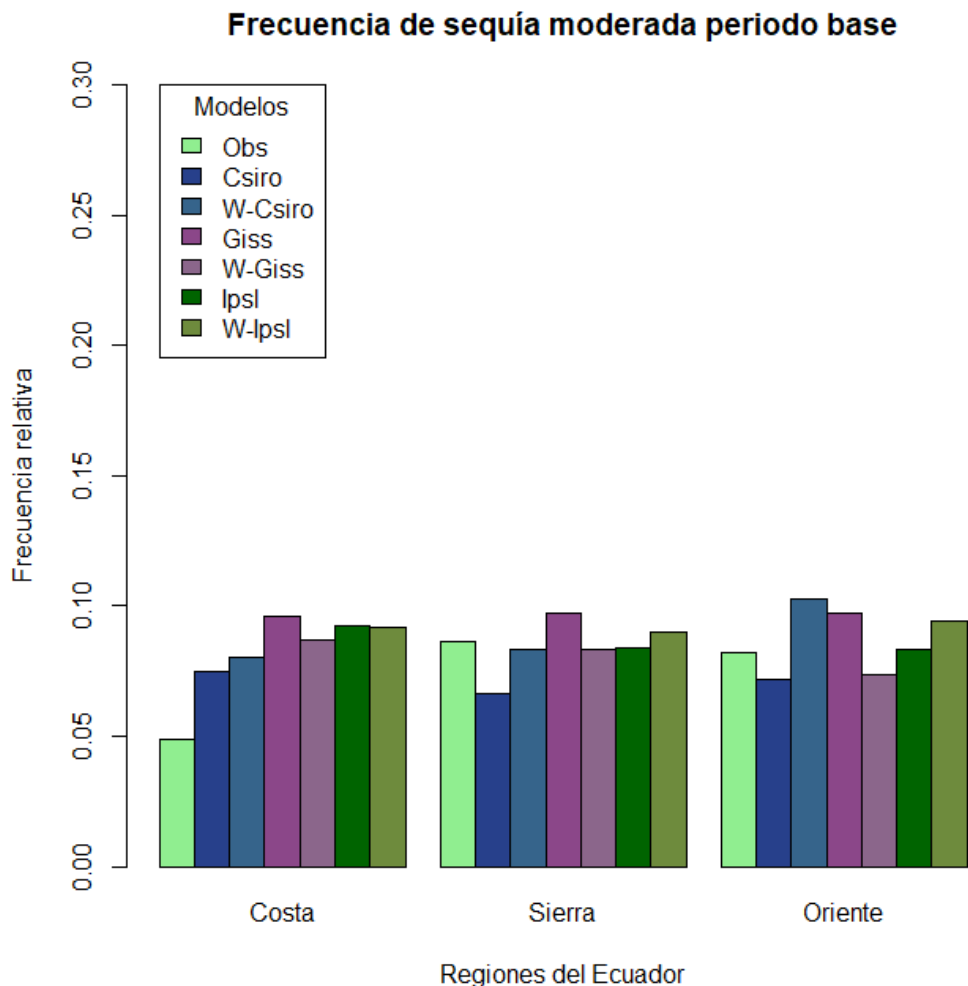


Figura 9: Frecuencia relativa de sequía moderada en regiones del Ecuador de Obs, GCMs y W-GCMs en el periodo base (1981-2005).

Las frecuencias de sequía moderada (figura 9) se presentan con sobrestimaciones en la región costa, el modelo Csiro presenta la menor sobrestimación y el modelo Giss la mayor subestimación respecto a las observaciones. Los modelos con reducción de escala W-Csiro presenta un aumento de sobrestimación, el modelo W-Giss presenta una reducción de sobrestimación y el modelo W-Ipsl presenta una leve reducción de sobrestimación.

En la sierra el modelo Csiro presenta subestimación, el modelo Giss sobrestimación y el modelo Ipsl presenta frecuencia muy cerca de las observadas. El modelo con reducción de escala W-Csiro presenta sobrestimación, el W-Giss una leve subestimación y el modelo W-Ipsl presenta una leve sobrestimación.

En el oriente el modelo Csiro presenta subestimación, el modelo Giss presenta sobrestimación y el modelo Ipsl presenta frecuencia muy apegada a las observadas. El modelo W-Csiro evidencia sobrestimación, el modelo W-Giss presenta subestimación leve y el modelo W-Ipsl presenta una sobrestimación leve.

Mediante este análisis en el periodo base se llegó a la conclusión de que los modelos con W-GCMs presentan mejores resultados que los GCMs por lo que para el análisis de proyecciones futuras se utilizó únicamente datos de modelos W-GCMs en sus respectivos escenarios.

4.2.2 Proyecciones futuras de sequias de modelos W-GCMs para los escenarios RCP (4.5 y 8.5)

El análisis de los eventos de sequía en regiones climatológicas del Ecuador permitió identificar regiones y escenarios en los cuales los eventos de sequía varíen de manera más significativa. Las proyecciones fueron realizadas usando el periodo base (1981-2005) como referencia para las proyecciones futuras en el periodo (2041-2070) en los escenarios RCP 4.5 y 8.5.

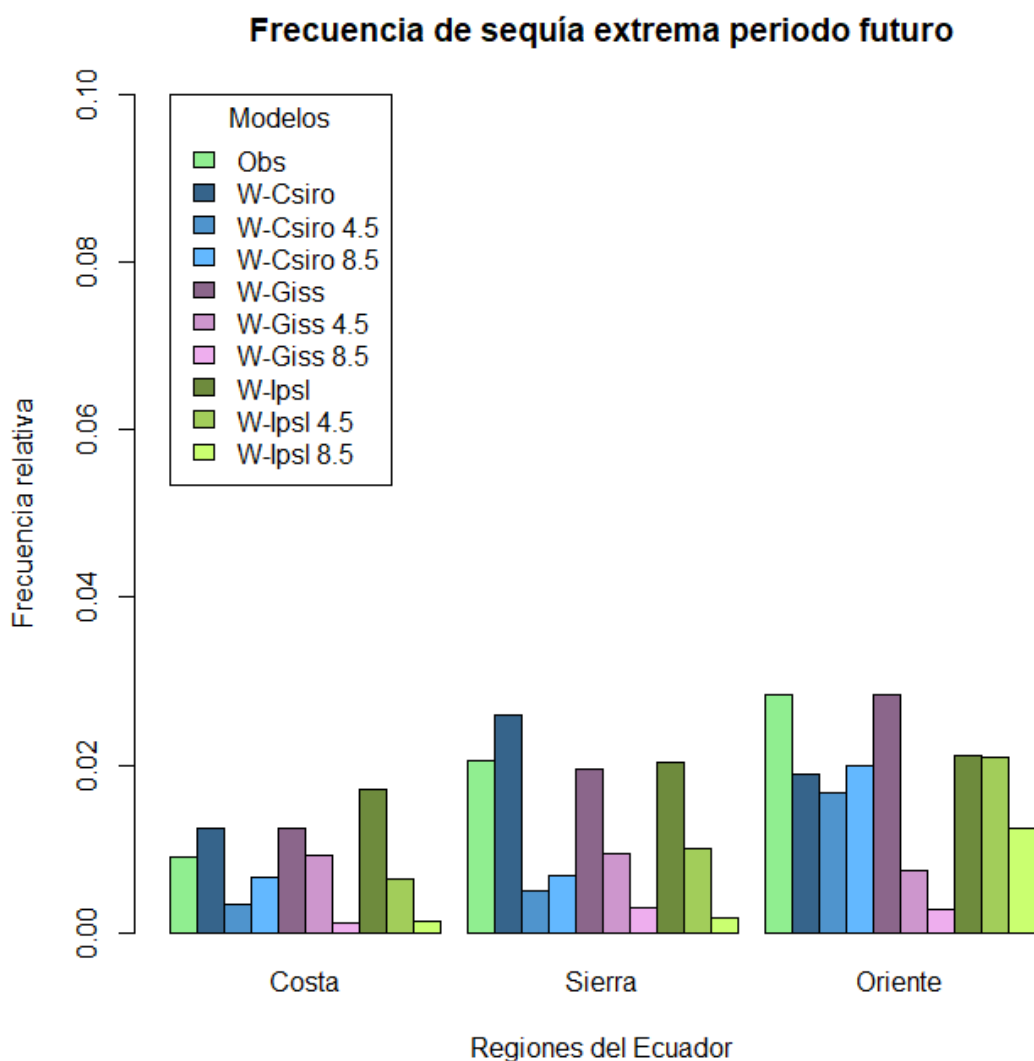


Figura 10: Frecuencia relativa de sequía extrema, en regiones del Ecuador para periodo base (1981-2005) de las observaciones y los modelos (W-Csiro, W-Giss, W-Ipsl), y en el futuro (2041-2070) de los mismos modelos en los escenarios RCP 4.5 y 8.5.

Las proyecciones de sequías extrema (figura 10) en el la costa, sierra y oriente para el escenario de emisiones medias RCP 4.5 el modelo W-Csiro presenta una reducción de frecuencia de sequía muy pronunciada, los modelos W-Giss y W-Ipsl presentan una reducción de frecuencia de sequía respecto al periodo base. En el escenario de emisiones altas RCP 8.5 el modelo W-Csiro presenta una reducción de frecuencia de sequía respecto al periodo base y un aumento respecto al escenario 4.5, el modelo W-Giss presenta una reducción más fuerte de frecuencia de sequía respecto al modelo en el escenario 4.5, el W-Ipsl presenta una reducción más pronunciada de frecuencia de sequía respecto al modelo en el escenario 4.5.

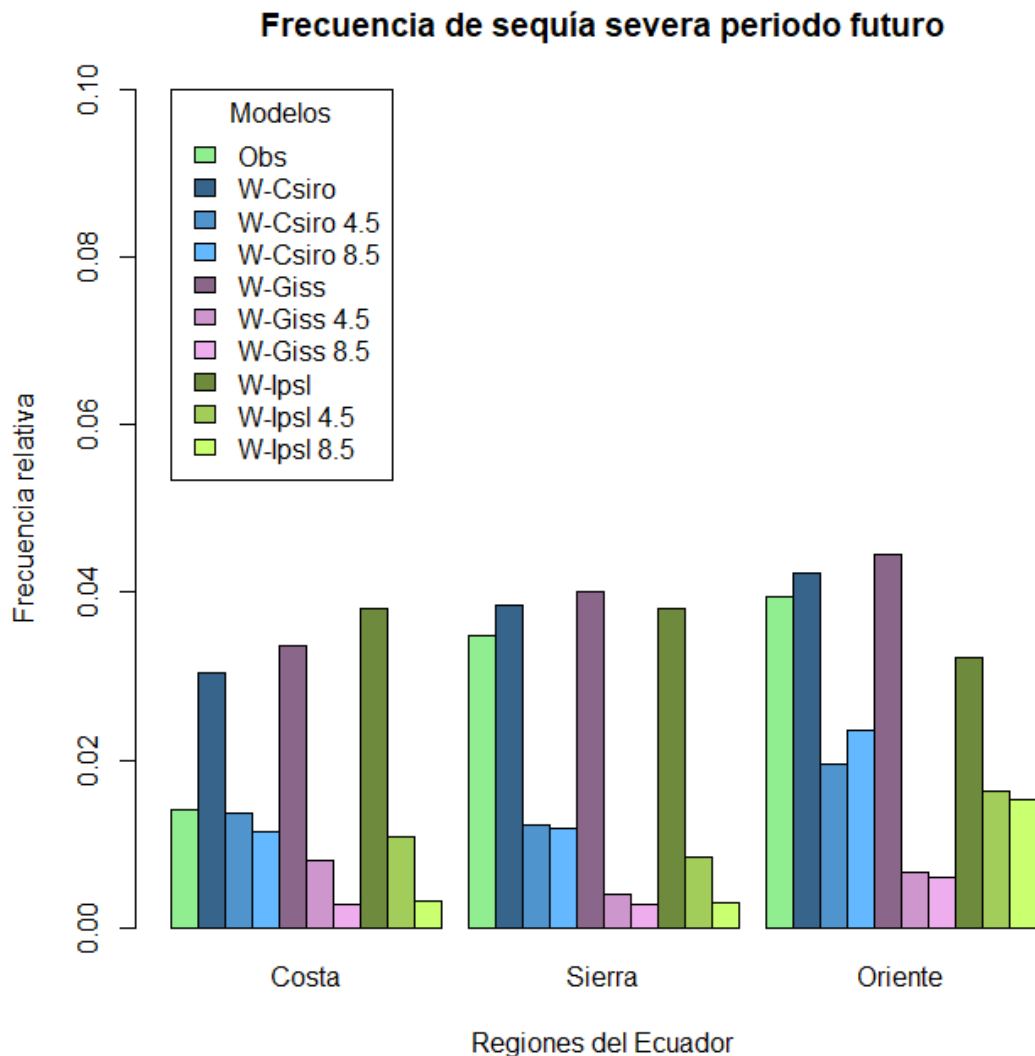


Figura 11: Frecuencia relativa de sequía severa, en regiones del Ecuador para periodo base (1981-2005) de las observaciones y los modelos (W-Csiro, W-Giss, W-Ipsl), y en el futuro (2041-2070) de los modelos en los escenarios RCP 4.5 y 8.5.

Las frecuencias de sequías severas (Figura 11) en la región costa en el escenario de emisiones medias RCP 4.5 el modelo W-Csiro muestra disminución drástica de frecuencia con respecto al mismo modelo en el periodo base, además se parecía una leve disminución de frecuencia respecto a las observaciones. El modelo W-Giss presenta una disminución muy fuerte de frecuencia de sequía respecto al modelo el periodo base y a las observaciones. El modelo W-Ipsl presenta una reducción pronunciada respecto al periodo base y a las observaciones.

En el escenario de emisiones altas RCP 8.5 en la región costa el modelo W-Csiro muestra disminución drástica respecto al periodo base y una leve disminución respecto al

escenario 4.5 de frecuencia de sequía, el modelo W-Giss presenta una disminución de frecuencia más fuerte respecto al escenario 4.5 y a las observaciones. El modelo W-Ipsl presenta una reducción más pronunciada respecto al escenario de emisiones RCP 4.5

En la región sierra en el escenario de emisiones medias RCP 4.5 el modelo W-Csiro prevé una reducción de frecuencias drástica respecto a su periodo base y a las observaciones. El modelo W-Giss presenta disminución drástica de eventos de sequía respecto al periodo base y a las observaciones. El modelo W-Ipsl proyecta una reducción muy pronunciada respecto al modelo en el periodo base y a las observaciones.

El escenario de emisiones altas RCP 8.5 prevé una disminución más pronunciada por parte del modelo W-Csiro respecto al escenario 4.5. El modelo W-Giss presenta una reducción de frecuencia de sequía más severa que en el escenario 4.5. El modelo W-Ipsl presenta la igual que los dos modelos anteriores una reducción más fuerte de frecuencia de sequía respecto al escenario 4.5.

En la región oriental el modelo W-Csiro en el escenario de emisiones RCP 4.5 presenta una disminución de frecuencia de sequía fuerte respecto al modelo en el periodo base y a las observaciones. El modelo W-Giss en el escenario de emisiones medias RCP 4.5 proyecta un decremento de frecuencia muy pronunciado respecto al periodo base y a las observaciones. El modelo W-Ipsl proyecta reducción de frecuencia de sequía respecto al periodo base y a las observaciones en el escenario de emisiones medias8.

En el escenario de emisiones altas RCP 8.5, el modelo W-Csiro presenta una reducción respecto al periodo base y un aumento respecto al escenario RCP 4.5. El modelo W-Giss en el escenario de emisiones altas RCP 8.5 prevé una reducción un poco más severa respecto al escenario 4.5. El modelo W-Ipsl se prevé una reducción de frecuencia un poco más pronunciada que en el escenario 4.5.

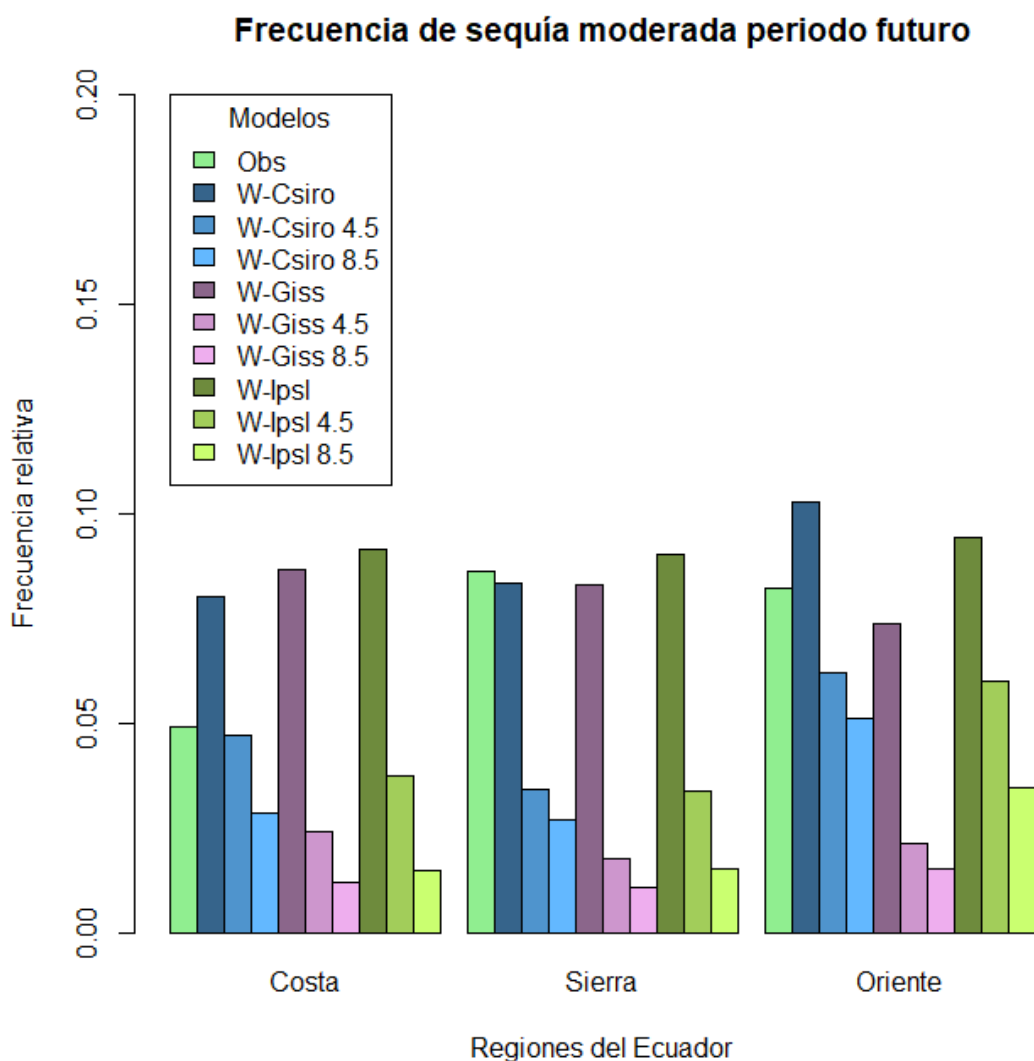


Figura 12: Frecuencia relativa de sequía moderada, en regiones del Ecuador para periodo base (1981-2005) de las observaciones y los modelos (W-Csiro, W-Giss, W-Ipsl), y en el futuro (2041-2070) de los modelos en los escenarios RCP 4,5 y 8,5.

La figura 12 muestra las proyecciones futuras de sequía moderada. En la región costa el modelo W-Csiro muestra una reducción de frecuencia respecto al periodo base y una leve reducción con respecto a las observaciones en el escenario RCP 4.5 y una reducción más fuerte en el escenario de emisiones altas RCP 8.5. El modelo W-Giss proyecta una reducción fuerte de frecuencia respecto al periodo base y a las observaciones en el escenario de emisiones medias RCP 4.5, y para el escenario RCP 8.5 se prevé una reducción de frecuencia un poco más severa que el escenario de emisiones medias. El modelo W-Ipsl muestra una leve disminución de frecuencia respecto al periodo base y a

las observaciones en el escenario medio RCP 4.5, el escenario RCP 8.5 presenta una reducción más pronunciada de la frecuencia de sequía moderada.

En la región sierra el modelo W-Csiro en el escenario de emisiones medias RCP 4.5 proyecta una elevada disminución de frecuencia de sequía respecto al periodo base y una mayor reducción con respecto a las observaciones, en el escenario RCP 8.5 se acentúa más la reducción de frecuencia de sequía. El modelo W-Giss proyecta una dramática reducción de frecuencia de sequía moderada respecto al periodo base y a las observaciones, en el escenario de emisiones altas se prevé una reducción un poco más fuerte respecto al escenario de emisiones medias. El modelo W-Ipsl en el escenario RCP 4.5 presenta una reducción elevada reducción de frecuencia de sequía en respecto al periodo base y a las observaciones, el escenario de emisiones altas RCP 8.5 se aprecia una reducción más fuerte de frecuencia.

En la región oriente el modelo W-Csiro proyecta una reducción de frecuencia con respecto a su periodo base y a las observaciones en el escenario de emisiones medias, en el escenario de emisiones altas RCP 8.5 se aprecia una reducción una reducción de frecuencia un poco más pronunciada. El modelo W-Giss proyecta una reducción fuerte de frecuencia respecto al periodo base y a las observaciones en el escenario medio RCP 4.5, en el escenario de emisiones altas RCP 8.5 se aprecia una reducción de frecuencia más fuerte. El modelo W-Ipsl proyecta reducción de frecuencia de sequía respecto al periodo base y a las observaciones en el escenario de emisiones media RCP 4.5, para el escenario de emisiones altas RCP 8.5 la proyección muestra una reducción de frecuencia más fuerte que en el escenario RCP 4.5.

4.2.3 Variación de patrones temporales de sequía.

a) Frecuencia relativa de sequía extrema

Región	Mes	COSTA											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
OBS		0.0	0.1	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
W-PRES													
	W-Csiro	0.2	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.3	0.1	0.1
	W-Giss	0.1	0.3	0.2	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.0	0.0
	W-Ipsl	0.3	0.2	0.2	0.1	0.3	0.0	0.1	0.0	0.2	0.1	0.1	0.1
W-FUT-4,5													
	W-Csiro	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
	W-Giss	0.1	0.0	0.0	0.1	0.1	0.6	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	W-Ipsl	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.2	0.0	0.0	0.0
W-FUT-8,5													
	W-Sciro	0.0	0.0	0.0	0.3	0.2	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
	W-Giss	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	W-Ipsl	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0

b) Frecuencia relativa de sequía severa

Región	Mes	COSTA											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
OBS		0.1	0.2	0.3	0.3	0.2	0.2	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0
W-PRES													
	W-Csiro	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.0	0.4	0.2	0.3	0.4	0.5
	W-Giss	0.3	0.1	0.4	0.7	0.4	0.4	0.2	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2
	W-Ipsl	0.5	0.3	0.4	0.7	0.3	0.5	0.1	0.3	0.3	0.3	0.2	0.3
W-FUT-4,5													
	W-Sciro	0.2	0.2	0.1	0.0	0.2	0.4	0.1	0.2	0.0	0.0	0.1	0.0
	W-Giss	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.3	0.3	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1
	W-Ipsl	0.0	0.0	0.1	0.2	0.1	0.3	0.1	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0
W-FUT-8,5													
	W-Sciro	0.0	0.0	0.0	0.1	0.4	0.4	0.1	0.2	0.0	0.1	0.0	0.0
	W-Giss	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	W-Ipsl	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0

c) Frecuencia relativa de sequía moderada

Región	Mes	COSTA											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
OBS		0.5	0.6	0.5	0.5	0.7	0.6	0.3	0.2	0.6	0.5	0.2	0.3
W-PRES													
	W-Csiro	0.6	1.0	0.8	0.8	0.7	0.7	0.4	0.9	0.4	0.5	1.1	0.6
	W-Giss	0.6	0.6	0.7	1.0	0.6	0.8	0.6	0.7	0.9	0.5	0.9	1.1
	W-Ipsl	0.5	0.7	0.8	0.5	0.5	1.1	1.0	0.8	0.8	0.7	0.9	1.0
W-FUT-4,5													
	W-Csiro	0.4	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.7	0.9	0.4	0.1	0.3	0.6
	W-Giss	0.1	0.0	0.1	0.3	0.3	0.8	0.4	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
	W-Ipsl	0.1	0.3	0.5	0.4	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.1	0.0	0.1
W-FUT-8,5													
	W-Csiro	0.0	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.3	0.6	0.4	0.2	0.1	0.0
	W-Giss	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.5	0.2	0.0	0.1	0.2	0.1	0.0
	W-Ipsl	0.2	0.2	0.1	0.1	0.3	0.3	0.1	0.1	0.2	0.0	0.0	0.0

Figura 13: Análisis de la variación temporal de los patrones de sequía extrema (a), sequía severa (b) y sequía moderada (c) respectivamente en la región costa del Ecuador.

En la región costa (figura 13 a) las observaciones muestran que la sequía extrema ocurre de manera más frecuente en los meses marzo y abril. Los 3 modelos en el periodo base sobrestiman. Las proyecciones de sequía extrema para el escenario de emisiones medias RCP 4.5 proyecta una reducción de frecuencia en la mayoría de meses excepto en junio donde se presenta un incremento de frecuencia de sequía respecto al periodo base. Para el escenario de emisiones altas RCP 8.5 se prevé una reducción más fuerte de frecuencia respecto al escenario RCP 4.5 en el modelo W-Giss y W-Ipsl, el modelo W-Csiro presenta un incremento en abril y mayo.

La frecuencia de sequía severa (figura 13 b) las observaciones muestran que los meses con mayor frecuencia de sequía son marzo y abril. Los modelos en el periodo base sobrestiman frecuencias en la mayoría de meses. En el escenario de emisiones medias RCP 4.5 los 3 modelos proyectan una reducción de frecuencia de sequía en todos los meses respecto a las observaciones. Excepto junio y diciembre donde se prevé un leve aumento de frecuencia de sequía. El escenario de emisiones RCP 8.5, los 3 modelos presentan una reducción más fuerte frecuencia de sequía severa la mayoría de meses, excepto en junio donde se aprecia un aumento respecto a las observaciones.

La frecuencia de sequía moderada (figura 13 c) muestra que en las observaciones la mayor frecuencia de sequía se produce en mayo y septiembre. Los modelos en el periodo base sobrestiman frecuencias en la mayoría de meses. En el escenario de emisiones medias RCP 4.5 los 3 modelos proyectan una reducción de frecuencia de sequía en todos los meses respecto a las observaciones, excepto agosto y septiembre donde se prevé un aumento de frecuencia de sequía. El escenario de emisiones RCP 8.5, los 3 modelos presentan una reducción más fuerte frecuencia de sequía moderada en todos los meses.

a) Frecuencia relativa de sequía extrema

Región	SIERRA											
Mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
OBS	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2
W-PRES												
W-Csiro	0.3	0.0	0.3	0.4	0.1	0.0	0.0	0.1	0.3	0.4	0.1	0.5
W-Giss	0.2	0.5	0.1	0.2	0.0	0.0	0.1	0.1	0.3	0.3	0.1	0.1
W-Ipsl	0.3	0.4	0.2	0.0	0.2	0.0	0.1	0.1	0.4	0.1	0.1	0.1
W-FUT-4,5												
W-Csiro	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0
W-Giss	0.1	0.0	0.0	0.2	0.2	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
W-Ipsl	0.0	0.0	0.2	0.1	0.1	0.1	0.0	0.2	0.2	0.0	0.0	0.0
W-FUT-8,5												
W-Csiro	0.0	0.0	0.0	0.2	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0
W-Giss	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
W-Ipsl	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0

b) Frecuencia relativa de sequía severa

Región	SIERRA											
Mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
OBS	0.3	0.4	0.3	0.4	0.4	0.3	0.3	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3
W-PRES												
W-Csiro	0.6	0.4	0.2	0.3	0.4	0.4	0.2	0.5	0.2	0.4	0.6	0.2
W-Giss	0.5	0.5	0.7	0.3	0.4	0.5	0.4	0.4	0.4	0.2	0.4	0.3
W-Ipsl	0.3	0.3	0.3	0.5	0.4	0.6	0.3	0.6	0.2	0.3	0.4	0.4
W-FUT-4,5												
W-Csiro	0.2	0.0	0.1	0.0	0.0	0.4	0.2	0.1	0.2	0.0	0.1	0.1
W-Giss	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
W-Ipsl	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0
W-FUT-8,5												
W-Csiro	0.0	0.0	0.0	0.3	0.3	0.3	0.1	0.1	0.0	0.2	0.0	0.0
W-Giss	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
W-Ipsl	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0

c) Frecuencia relativa de sequía moderada

Región	SIERRA											
Mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
OBS	0.6	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.9	0.9	0.9	0.9	0.6	0.7
W-PRES												
W-Csiro	0.7	1.0	0.7	0.4	0.6	0.9	0.8	0.7	0.6	0.4	1.1	0.6
W-Giss	0.8	0.3	0.5	1.1	0.7	1.0	0.6	0.6	0.9	0.5	0.7	0.9
W-Ipsl	0.9	0.5	0.8	0.8	0.7	0.9	0.7	0.8	0.7	0.8	0.8	1.0
W-FUT-4,5												
W-Csiro	0.4	0.3	0.2	0.1	0.2	0.4	0.4	0.7	0.4	0.2	0.2	0.1
W-Giss	0.1	0.0	0.0	0.1	0.2	0.6	0.3	0.2	0.0	0.0	0.1	0.2
W-Ipsl	0.1	0.3	0.3	0.5	0.5	0.6	0.3	0.3	0.3	0.1	0.1	0.1
W-FUT-8,5												
W-Csiro	0.1	0.0	0.0	0.2	0.3	0.4	0.5	0.3	0.3	0.4	0.1	0.1
W-Giss	0.0	0.0	0.1	0.1	0.3	0.3	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.0
W-Ipsl	0.2	0.3	0.2	0.1	0.2	0.2	0.0	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0

Figura 14: Análisis de la variación temporal de los patrones de sequía extrema (a), sequía severa (b) y sequía moderada (c) respectivamente en la región sierra del Ecuador.

En región sierra las observaciones indican una mayor frecuencia de sequías extrema (figura 14 a) en los meses de abril y junio. Los 3 modelos sobrestiman los eventos de sequía extrema en la mayoría de meses. En el escenario de emisiones medias RCP 4.5 las frecuencias de SE en la región sierra disminuyen en la mayoría de meses respecto a las observaciones excepto en junio donde el modelo W-Giss presenta un aumento, los 2 modelos restantes presentan una disminución general de frecuencia de SE. El escenario de emisiones altas RCP 8.5 la frecuencia de sequía extrema se reduce en todos los meses en los 3 modelos respecto a las observaciones y una leve respecto al escenario RCP 4.5.

La frecuencia de sequía severa en la región sierra se producen en los meses de abril y mayo, por parte de los modelos en el periodo base se aprecia una sobrestimación de los 3 modelos en la mayoría de meses (figura 14 b). En el escenario de emisiones medias RCP 4.5 las frecuencias de SS en la región sierra disminuyen en la mayoría de meses respecto a las observaciones excepto en junio donde el modelo W-Csiro presenta un aumento, los 2 modelos restantes presentan una disminución general de frecuencia de SS. El escenario de emisiones altas RCP 8.5 la frecuencia de SS se reduce en todos los meses en los 3 modelos respecto a las observaciones y una leve reducción respecto al escenario RCP 4.5.

La frecuencia de sequía moderada en la región sierra se producen en los meses de junio y noviembre, por parte de los modelos en el periodo base se aprecia una sobrestimación de los 3 modelos en la mayoría de meses (figura 14 c). En el escenario de emisiones medias RCP 4.5 las frecuencias de SM en la región sierra disminuye en todos los meses en los 3 modelos respecto a las observaciones. El escenario de emisiones altas RCP 8.5 la frecuencia de SM se reduce en todos los meses en los 3 modelos respecto a las observaciones y una leve reducción respecto al escenario RCP 4.5.

a) Frecuencia relativa de sequía extrema

Región	ORIENTE											
Mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
OBS	0.2	0.2	0.3	0.1	0.2	0.2	0.3	0.2	0.1	0.4	0.2	0.3
W-PRES												
W-Csiro	0.2	0.0	0.2	0.3	0.2	0.1	0.1	0.1	0.3	0.2	0.1	0.3
W-Giss	0.1	0.7	0.4	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.4	0.3	0.2	0.2
W-Ipsl	0.2	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3	0.1	0.3	0.2	0.3	0.1
W-FUT-4,5												
W-Csiro	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.1	0.0	0.0	0.2	0.3	0.3
W-Giss	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
W-Ipsl	0.0	0.1	0.1	0.0	0.2	0.5	0.4	0.1	0.3	0.1	0.0	0.0
W-FUT-8,5												
W-Csiro	0.1	0.0	0.0	0.4	0.2	0.3	0.2	0.0	0.0	0.5	0.3	0.1
W-Giss	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
W-Ipsl	0.0	0.1	0.0	0.0	0.2	0.3	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0

b) Frecuencia relativa de sequía severa

Región	ORIENTE											
Mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
OBS	0.4	0.6	0.2	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.7	0.2	0.4	0.4
W-PRES												
W-Csiro	0.8	0.2	0.3	0.4	0.6	0.4	0.3	0.5	0.1	0.5	0.6	0.4
W-Giss	0.8	0.4	0.3	0.4	0.5	0.6	0.4	0.3	0.2	0.3	0.4	0.5
W-Ipsl	0.8	0.2	0.3	0.2	0.2	0.2	0.3	0.2	0.3	0.2	0.3	0.8
W-FUT-4,5												
W-Csiro	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1	0.5	0.3	0.1	0.2	0.1	0.3	0.1
W-Giss	0.1	0.0	0.0	0.1	0.3	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
W-Ipsl	0.0	0.1	0.2	0.3	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.0	0.2	0.1
W-FUT-8,5												
W-Csiro	0.0	0.1	0.0	0.2	0.2	0.5	0.2	0.3	0.1	0.4	0.4	0.1
W-Giss	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0
W-Ipsl	0.1	0.1	0.0	0.1	0.4	0.1	0.2	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0

c) Frecuencia relativa de sequía moderada

Región	ORIENTE											
Mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
OBS	0.6	0.3	0.7	0.9	0.8	0.9	0.7	0.8	0.7	0.8	0.7	0.6
W-PRES												
W-Csiro	0.8	1.3	0.9	0.4	0.6	1.3	1.2	0.7	0.9	0.6	1.0	0.9
W-Giss	0.7	0.1	0.6	0.7	0.8	0.7	0.8	0.8	0.8	0.6	0.6	0.6
W-Ipsl	0.6	0.6	0.7	1.2	0.9	1.1	0.7	1.2	0.5	0.9	0.6	0.7
W-FUT-4,5												
W-Csiro	0.5	0.2	0.2	0.1	0.4	0.8	0.7	0.9	0.6	0.5	0.8	0.6
W-Giss	0.2	0.1	0.0	0.0	0.1	0.4	0.2	0.6	0.0	0.1	0.0	0.4
W-Ipsl	0.2	0.3	0.0	0.6	1.0	0.7	0.6	0.9	0.5	0.6	0.3	0.4
W-FUT-8,5												
W-Csiro	0.0	0.1	0.4	0.5	0.6	0.7	0.5	0.4	0.5	0.3	0.6	0.4
W-Giss	0.0	0.0	0.0	0.2	0.4	0.3	0.0	0.3	0.1	0.0	0.1	0.0
W-Ipsl	0.1	0.6	0.5	0.1	0.6	0.5	0.1	0.4	0.1	0.0	0.2	0.1

Figura 15: Análisis de la variación temporal de los patrones de sequía extrema (a), sequía severa (b) y sequía moderada (c) respectivamente en la región oriental del Ecuador.

En la región oriental (figura 15 a) la mayor cantidad de sequías extremas ocurren en los meses de marzo, julio, octubre y diciembre y son las frecuencias más altas respecto a la región costa y sierra, por parte de los modelos se aprecia sobrestimaciones y subestimaciones en distintos meses. El escenario de emisiones medias RCP 4.5 proyecta por parte de los 3 modelos una reducción de frecuencia de SE en la mayoría de meses, excepto en junio donde se aprecia un incremento respecto a las observaciones. El escenario de emisiones RCP 8.5 presenta una reducción más fuerte que el escenario RCP 4.5 y un leve incremento en el mes de junio respecto a las observaciones.

La sequía severa en la región oriente (figura 15 b) ocurre de manera más frecuente en los meses de febrero y octubre. Los 3 modelos presentan mayoritariamente subestimaciones en la mayoría de meses. El escenario de emisiones media RCP 4.5 proyecta una reducción de frecuencia de SS por parte de los 3 modelos en todos los meses, excepto el modelo W-Csiro que presenta un aumento en el mes de junio. En el escenario de emisiones altas RCP 8.5 los eventos de SS se proyecta una reducción más fuerte de SS respecto al escenario RCP 4.5 y a las observaciones en todos los meses excepto en junio donde los modelos W-Csiro y W-Giss presentan un aumento de frecuencia.

La sequía severa en la región oriente (figura 15 b) se producen en abril y junio, los modelos en el periodo base sobrestiman la frecuencia en la mayoría de meses. El escenario de emisiones medias RCP 4.5 presenta una reducción de frecuencia de SM respecto a las observaciones en todos los meses por parte del modelo W-Giss y un aumento en el mes de agosto por parte de los modelos W-Csiro y W-Ipsl. El escenario de emisiones altas RCP 8.5 presenta una reducción de frecuencia de SM por parte de los 3 modelos en todos los meses.

4.2.4 Proyecciones de los patrones espaciales de sequía.

Frecuencia relativa de sequía extrema

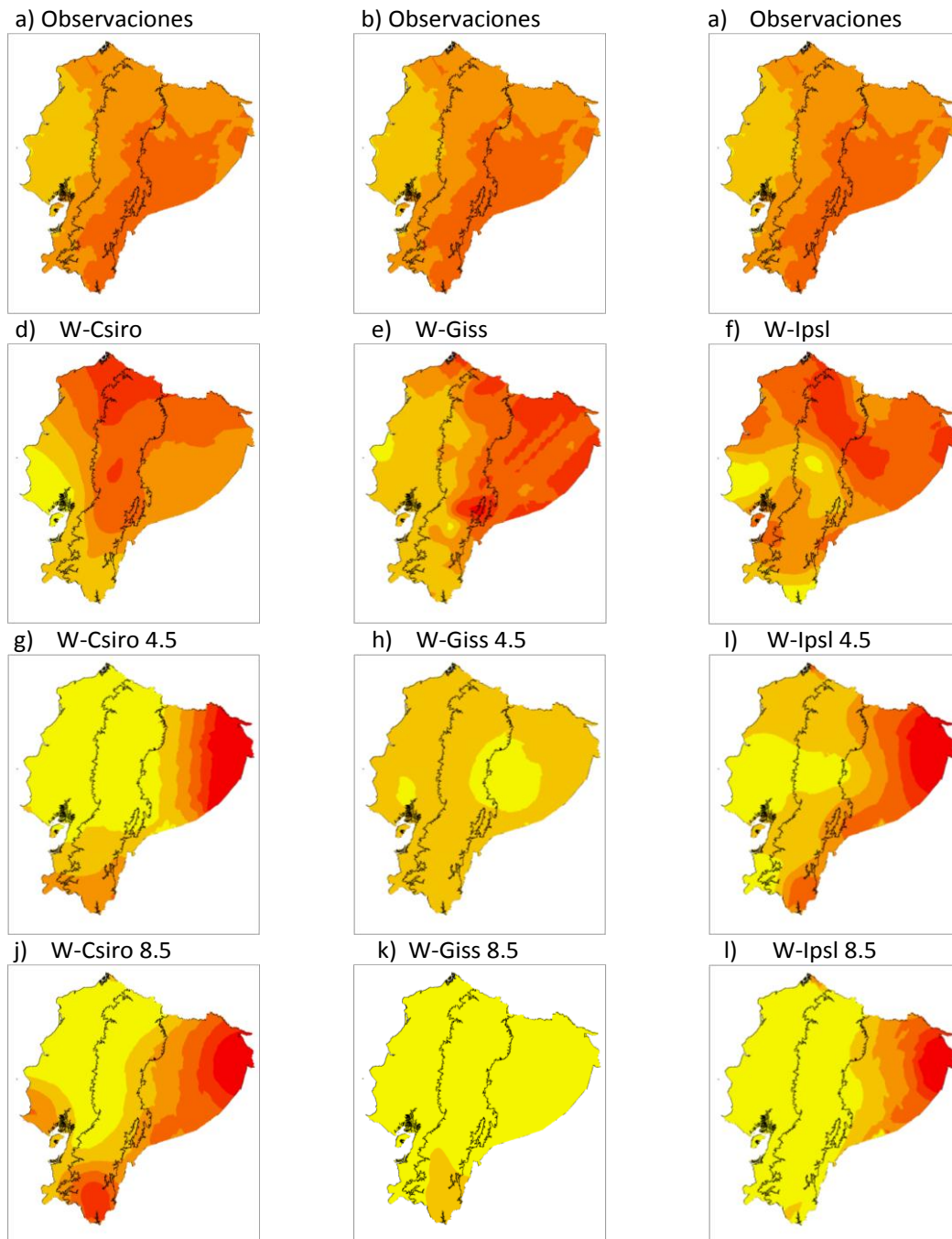


Figura 16: Patrones espaciales de la frecuencia relativa de sequía extrema de: observaciones (a,b,c), modelos W-Csiro(d), W-Giss(e) y W-Ipsl(f) en presentes (1981-2005), modelos en futuro (2041-2070) W-Csiro 4,5(g), W-Giss 4,5 (h) y W-Ipsl 4,5(I) W-Csiro 8,5(g), W-Giss 8,5 (h) y W-Ipsl 8,5(I) respectivamente.

Los patrones espaciales de sequía extrema muestran que en el periodo base las observaciones muestran una frecuencia de sequias mayor en la sierra y el oriente como se observa en la figura 16 y la región costa muestra la menor frecuencia de SE, los modelos, sin embargo, muestran diferentes patrones y se aprecia una sobrestimación de frecuencia de sequía extrema principalmente en la región sierra y oriente.

Los patrones espaciales para 2041-2070 muestran en el escenario RCP 4,5 un decrecimiento de frecuencias de SE en la región costa y sierra, sin embargo, en el oriente se prevé un aumento de frecuencia de sequía extrema en los modelos W-Csiro y W-Ipsl, principalmente en la zona limítrofe con Colombia. El modelo W-Giss muestra una disminución de frecuencia de sequía extrema en todo el país.

En el escenario de emisiones RCP 8,5 existe una reducción de frecuencias de SE, de manera más pronunciada respecto al escenario RCP 4.5 y a las observaciones en el modelo W-Giss e Ipsl, el modelo W-Csiro proyecta un ligero aumento de frecuencia respecto al escenario de emisiones RCP 4,5, el modelo W-Giss es el que presenta una reducción de frecuencia de SE más intensa en todo el país.

Frecuencia relativa de sequía severa

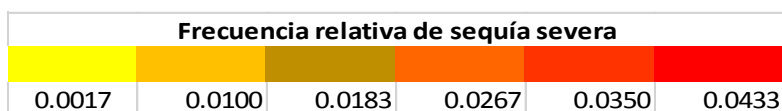
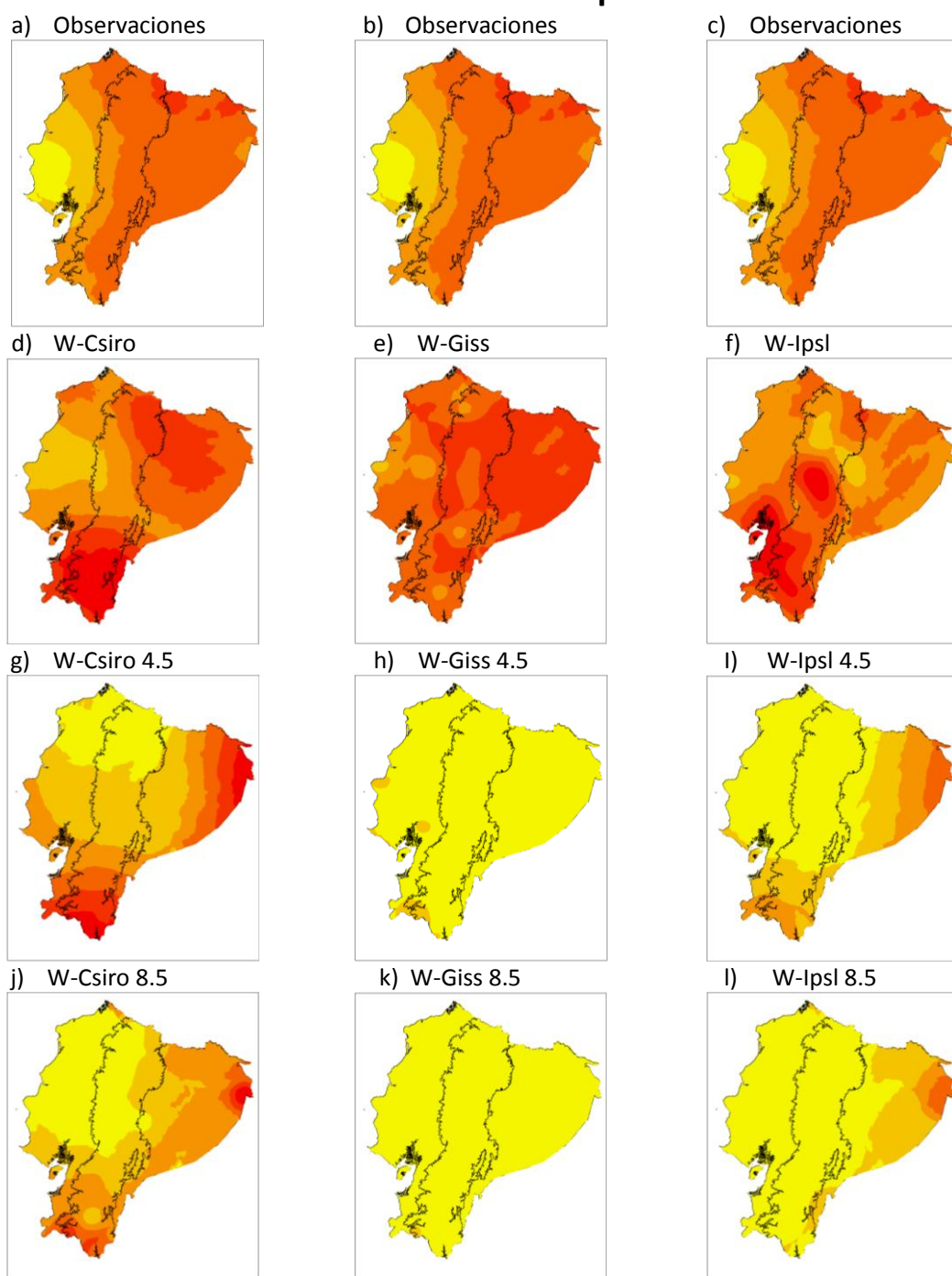


Figura 17: Patrones espaciales de la frecuencia relativa de sequía severa de: observaciones (a,b,c), modelos W-Csiro(d), W-Giss(e) y W-Ipsl(f) en presentes (1981-2005), modelos en futuro (2041-2070) W-Csiro 4,5(g), W-Giss 4,5 (h) y W-Ipsl 4,5(I) W-Csiro 8,5(g), W-Giss 8,5 (h) y W-Ipsl 8,5(I) respectivamente.

Los patrones espaciales de sequía severa (figura 17) de las observaciones presenta que la frecuencia de SS es más pronunciada en la región sierra y oriente con más recurrencia en la región norte del país, la costa es la región con la menor frecuencia de sequía.

Los modelos en el periodo base muestran una sobrestimación de eventos en la mayor parte del Ecuador, sin embargo, la zona más sobrestimada es la sierra central-sur por parte de los modelos W-Giss y W-Ipsl y el modelo W-Csiro presenta una sobrestimación en el sur de la sierra.

Las proyecciones para el periodo 2041-2070 en el escenario de emisiones medias RCP 4.5 presenta una disminución de frecuencias de SS bastante marcada en las 3 regiones del país por parte de los modelos W-Giss y W-Ipsl, el modelo W-Csiro proyecta una reducción menos severa respecto a los otros 2 modelos y un aumento de frecuencia de SS en la parte sur de la región sierra.

El escenario de emisiones altas RCP 8.5, proyecta una disminución más fuerte de SS en todos los modelos y regiones del país, el modelo W-Giss proyecta una reducción más severa de eventos de SS.

Frecuencia relativa de sequía moderada

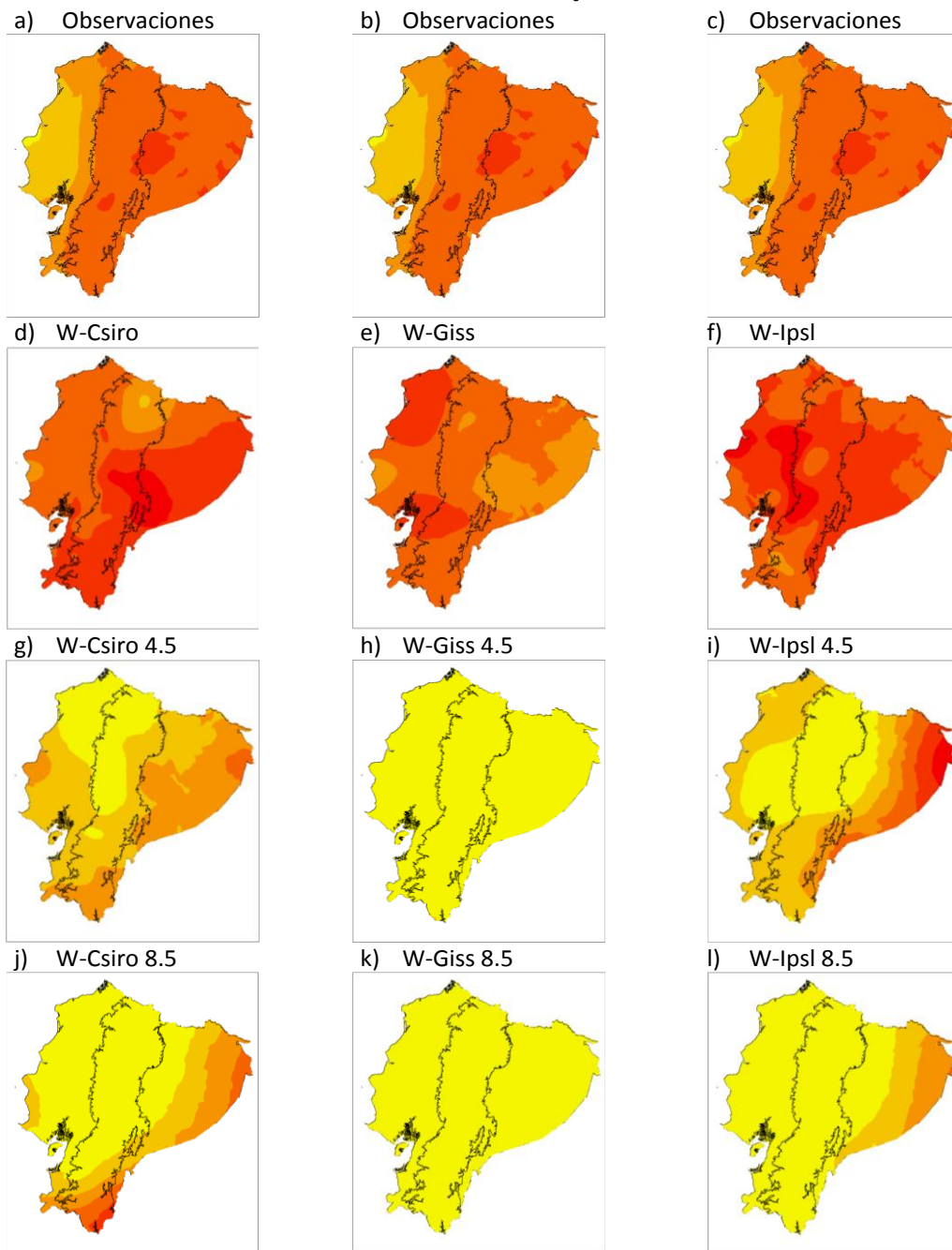


Figura 18: Patrones espaciales de la frecuencia relativa de sequía moderada de: observaciones (a,b,c), modelos W-Csiro(d), W-Giss(e) y W-Ipsl(f) en presentes (1981-2005), modelos en futuro (2041-2070) W-Csiro 4,5(g), W-Giss 4,5 (h) y W-Ipsl 4,5(I) W-Csiro 8,5(g), W-Giss 8,5 (h) y W-Ipsl 8,5(l) respectivamente.



La frecuencia de sequía moderada en el Ecuador de las observaciones muestran una mayor frecuencia de sequía en la región sierra y oriente de manera homogénea, en la costa se observa menores frecuencia de sequía moderada.

Los modelos en el periodo base presentan sobrestimaciones de eventos de SM en todas las regiones del país y por los 3 modelos como se puede apreciar en la figura 18.

Las proyecciones en el escenario de emisiones medias RCP 4.5 indica un decremento dramático de la frecuencia de sequía moderada en todas las regiones del país, únicamente el modelo W-Ipsl proyecta un incremento de sequía moderada en la parte oeste del oriente con respecto a las observaciones, el modelo W-Giss proyecta una disminución más severa respecto a los otros 2 modelos en todo el Ecuador.

El escenario RCP 8,5 se observa un decremento mayor de sequía moderada respecto al escenario RCP 4,5 en todas las regiones del país, el modelo W-Csiro proyecta un ligero aumento de SM en la parte sur del país, el modelo W-Giss presenta un decremento más dramático de frecuencia en todas las regiones del Ecuador.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

5.1.1 Análisis de índices de sequía

El índice que mejores resultados presenta respecto al SPI en el Ecuador en todos los tipos de sequías es el Z-Score y sus resultados mejoran conforme se aumente la escala temporal, es decir, que, a escalas de 9,12 meses presenta un mejor comportamiento respecto al SPI.

La clasificación propuesta (Morid et al., 2006) para índice de deciles presenta una adecuada clasificación para los eventos de sequía extrema y sequía severa, sin embargo, en sequía moderada y condiciones normales podría tener subestimaciones y sobrestimaciones en todo el país.

La categorización del porcentaje de precipitación normal usada por (Morid et al., 2006) presenta sobrestimaciones de los eventos de sequía extrema en la mayoría del país, además de una sobrestimaciones y subestimaciones de condiciones normales en la costa, sierra y oriente. El porcentaje de precipitación normal presenta resultados poco confiables y su uso es recomendable para cadenas de radiodifusión debido a su fácil entendimiento y fácil manera de cálculo.

5.1.2 Proyecciones futuras de sequia

El análisis realizado para identificar que tan adecuada son las proyecciones de los modelos en el periodo base (1981-2005), permitió identificar que los modelos que presentan una reducción de escala mediante WRF realizan mejores estimaciones de las frecuencias de sequias a nivel nacional respecto a los GCMs, es por eso que para las proyecciones futuras únicamente se utilizó modelos con reducción de escala mediante WRF.

En el periodo base las sequias se dan principalmente en la sierra y el oriente ecuatoriano. Los modelos presentan mayoritariamente sobrestimaciones de los eventos de sequía en todo el territorio nacional en el periodo base.

Las proyecciones futuras de sequía para el periodo 2041-2070 en el escenario de emisiones medias RCP 4.5 se estima una reducción drástica de la frecuencia de sequía en

todas las regiones del Ecuador, así también se prevé que las regiones que sentirán de manera más drástica la reducción de frecuencia de sequía serán la sierra y el oriente ecuatoriano.

Para el escenario de emisiones altas RCP 8.5 se prevé una reducción más dramática de frecuencia de sequía respecto al escenario de emisiones medias RCP 4.5 e igualmente las regiones que presentan un decremento más dramático de frecuencia de sequía son la sierra y el oriente.

El modelo W-Csiro es el único que proyecta un leve aumento de sequía extrema en las 3 regiones del país en el escenario de emisiones RCP 8.5 respecto al escenario RCP 4.5 únicamente para esa categoría de sequía, para SS y SM se comporta de manera similar a los otros modelos.

5.1.2 Análisis de patrones temporales.

El análisis de la variabilidad temporal presenta que las sequías en el periodo base de las observaciones se dan en diferentes meses en cada región del Ecuador en particular y que los 3 modelos tienden a sobrestimar en la mayoría de eventos de las tres categorías de sequía en las 3 regiones.

El escenario de emisiones medias RCP 4.5 se observa una reducción significativa de frecuencia de sequía en la mayoría de meses y en unos pocos presenta un aumento de su frecuencia respecto al periodo base en todas las categorías de sequía en las 3 regiones del Ecuador.

En el escenario de emisiones altas RCP 8.5 se presenta como un escenario fuerte en el que se acentúa la reducción de frecuencias de las 3 categorías de sequía en las 3 regiones del Ecuador respecto a las observaciones y un leve aumento respecto al escenario de emisiones medias RCP 4.5. Se prevé una reducción más drástica en las regiones sierra y oriente

El modelo W-Csiro es el único que proyecta un leve aumento de sequía extrema en las 3 regiones del país en el escenario de emisiones RCP 8.5 respecto al escenario RCP 4.5 únicamente para esa categoría de sequía, para SS y SM se comporta de manera similar a los otros modelos.

5.1.3 Variación de patrones espaciales.

Los patrones espaciales muestran que la mayor cantidad de las 3 categorías de sequía que se dan en el periodo base ocurre en la sierra y el oriente ecuatoriano, la costa es la región que presenta menor cantidad de sequía. Se aprecia una sobrestimación en la mayoría del país en las 3 regiones por parte de los 3 modelos en todas las categorías de sequía.

El escenario RCP 4,5 indican una disminución de los tres tipos de sequía en todo el Ecuador y un aumento en algunos casos en la parte oriental limítrofe con Colombia, el modelo Giss es el que presenta reducciones más elevadas de frecuencia de sequía.

Para el escenario RCP 8.5 se estima una reducción más acentuada de frecuencia de sequía extrema, severa y moderada en el Ecuador por parte del modelo Giss e Ipsl, el modelo Csiro prevé un aumento de sequía extrema respecto al escenario RCP 4.5, en sequía severa y moderada presenta una reducción mayor que la del escenario RCP 4.5 como los otros modelos.

El modelo que presenta las reducciones más drásticas de frecuencia de sequía es el Giss observándose esta tendencia en todo el Ecuador

5.2 Recomendaciones.

Una de las principales limitaciones que se observó en este estudio fue que los modelos en el periodo base tienden a sobrestimar los eventos de sequía, en la mayoría del país, y aunque los modelos con reducción de escala mediante WRF muestran una mejoría en las frecuencias, en general, siguen existiendo sobrestimaciones y subestimaciones importantes. Los análisis de patrones temporales muestran una correlación presumiblemente baja, porque los modelos en el periodo base no concuerdan con las observaciones en los periodos sequía. Es importante seguir realizando configuraciones de modelos regionales con los que se pueda mejorar las salidas de los GCMs y obtener mejor modelación climática.

Un aumento de estaciones en la región costa y principalmente en el oriente ayudaría a tener resultados más confiables ya que las estaciones en el oriente y la costa.



VI. BIBLIOGRAFÍA

- Armenta, G., Villa, J., & Jácome, P. (2016, June). Proyecciones Climaticas de precipitacion y temperatura para Ecuador, bajo distintos escenarios de cambio climático.
- Avilés, A. C. (2009). Generación Hidroeléctrica en el Ecuador: Posibles Beneficios en los Mercados de Carbono. *Banco Central de Ecuador*.
- Avilés, A., Célleri, R., Paredes, J., & Solera, A. (2015). Evaluation of Markov Chain Based Drought Forecasts in an Andean Regulated River Basin Using the Skill Scores RPS and GMSS. *Water Resources Management*, 29(6), 1949–1963.
<https://doi.org/10.1007/s11269-015-0921-2>
- Buytaert, W., Vuille, M., Dewulf, A., Urrutia, R., Karmalkar, A., & Célleri, R. (2010). Uncertainties in climate change projections and regional downscaling in the tropical Andes: implications for water resources management. Retrieved from <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/22084>
- Campozano, L., Sánchez, E., Aviles, A., & Samaniego, E. (2015). Evaluation of infilling methods for time series of daily precipitation and temperature: The case of the Ecuadorian Andes. *Maskana*, 5(1), 99–115.
- Cartografía de libre acceso (Escala Nacional) – Geoportal Ecuador. (n.d.). Retrieved January 15, 2018, from <http://www.geoportaligm.gob.ec/portal/index.php/descargas/cartografia-de-libre-acceso/registro/>
- Collier, M. A., Rotstayn, L. D., Kim, K.-Y., Hirst, A. C., & Jeffrey, S. J. (2013). Ocean circulation response to anthropogenic-aerosol and greenhouse gas forcing in the CSIRO-Mk3. 6 coupled climate model. *Aust. Meteorol. Oceanogr. J*, 63, 27–39.
- Council, N. R. (2011). *Advancing the science of climate change*. National Academies Press.
- Cruz, L. C. (1983). *El mapa bioclimatico y ecologico del Ecuador*. Banco Central del Ecuador.



- Dogan, S., Berktaş, A., & Singh, V. P. (2012). Comparison of multi-monthly rainfall-based drought severity indices, with application to semi-arid Konya closed basin, Turkey. *Journal of Hydrology*, 470, 255–268.
- Hisdal, H., Stahl, K., Tallaksen, L. M., & Demuth, S. (2001). Have streamflow droughts in Europe become more severe or frequent? *International Journal of Climatology*, 21(3), 317–333. <https://doi.org/10.1002/joc.619>
- Hourdin, F., Foujols, M.-A., Codron, F., Guemas, V., Dufresne, J.-L., Bony, S., ... Bopp, L. (2013). Impact of the LMDZ atmospheric grid configuration on the climate and sensitivity of the IPSL-CM5A coupled model. *Climate Dynamics*, 40(9–10), 2167–2192. <https://doi.org/10.1007/s00382-012-1411-3>
- IPCC. (2014). Climático (IPCC)(2014).“. *Cambio Climático*.
- Knutti, R., & Sedláček, J. (2013). Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections. *Nature Climate Change*, 3(4), 369–373.
- Lloyd-Hughes, B., & Saunders, M. A. (2002). A drought climatology for Europe. *International Journal of Climatology*, 22(13), 1571–1592.
- María de los Milagros Skansi, G. P., & Natalia Herrera, H. V. (2016). Descripción de índices para el monitoreo de sequía meteorológica implementados por el Centro Regional del Clima para el Sur de America del Sur. Retrieved from http://cra-sas.smn.gov.ar/es/content/monitoreo/reporte_sequias.pdf
- Martínez, G., Delgado, E., Pargas, R., Manzanilla, E., & Ramírez, H. (2007). Consideraciones generales sobre la producción y el comercio mundial de banano. I: producción, exportación e importación. *Revista Digital CENIAP Hoy*, (13).
- McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology* (Vol. 17, pp. 179–183). American Meteorological Society Boston, MA.



- Mishra, A. K., & Desai, V. R. (2005). Drought forecasting using stochastic models. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 19(5), 326–339.
<https://doi.org/10.1007/s00477-005-0238-4>
- Mora, D., Campozano, L., Cisneros, F., Wyseure, G., & Willems, P. (2014). Climate changes of hydrometeorological and hydrological extremes in the Paute basin, Ecuadorean Andes. Retrieved from <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/22094>
- Morid, S., Smakhtin, V., & Moghaddasi, M. (2006). Comparison of seven meteorological indices for drought monitoring in Iran. *International Journal of Climatology*, 26(7), 971–985.
<https://doi.org/10.1002/joc.1264>
- Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., Van Vuuren, D. P., ... others. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463(7282), 747.
- Moya, A., & Ortega, J. (2015). Aplicación del modelo meteorológico WRF para el pronóstico de precipitaciones en período lluvioso de Cuba, 2014. *Apuntes de Ciencia & Sociedad*, 5(1). <https://doi.org/10.18259/acs.2015021>
- Naranjo, P. (1981). *El clima del Ecuador*. Edit. Casa de la Cultura Ecuatoriana.
- Pachauri, R. K., Allen, M. R., Barros, V. R., Broome, J., Cramer, W., Christ, R., ... others. (2014). *Climate change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC. Retrieved from <https://epic.awi.de/37530/>
- Rivera, J. A. (2014). *Aspectos climatológicos de las sequías meteorológicas en el sur de Sudamérica. Análisis regional y proyecciones futuras*. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires. Retrieved from http://digital.bl.fcen.uba.ar/gsdL-282/cgi-bin/library.cgi?a=d&c=tesis&d=Tesis_5504_Rivera



- Rodríguez, A. (2010). *Evaluación de los modelos globales del clima utilizados para la generación de escenarios de cambio climático con el clima presente en Colombia* (climatico No. DEAM–METEO/009-2010 PRELIMINAR DEL IDEAM) (p. 110). Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. Retrieved from <http://modelos.ideam.gov.co/media/dynamic/escenarios/evaluacion-de-modelos-globales-ipcc.pdf>
- Samaniego, J., Cooperation, G. A. for T., & Gobierno, D. (2009). Cambio climático y desarrollo en América Latina y el Caribe. Reseña 2009. Retrieved from <http://repositorio.cepal.org/handle/11362/2975>
- Schmidt, G. A., Kelley, M., Nazarenko, L., Ruedy, R., Russell, G. L., Aleinov, I., ... Zhang, J. (2014). Configuration and assessment of the GISS ModelE2 contributions to the CMIP5 archive. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 6(1), 141–184. <https://doi.org/10.1002/2013MS000265>
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Wang, W., & Powers, J. G. (2005). *A Description of the Advanced Research WRF Version 2* (No. NCAR/TN-468+STR). NATIONAL CENTER FOR ATMOSPHERIC RESEARCH BOULDER CO MESOSCALE AND MICROSCALE METEOROLOGY DIV, NATIONAL CENTER FOR ATMOSPHERIC RESEARCH BOULDER CO MESOSCALE AND MICROSCALE METEOROLOGY DIV. Retrieved from <http://www.dtic.mil/docs/citations/ADA487419>
- Strzepek, K., Yohe, G., Neumann, J., & Boehlert, B. (2010). Characterizing changes in drought risk for the United States from climate change. *Environmental Research Letters*, 5(4), 044012. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/5/4/044012>
- Svoboda, M., Hayes, M., & Wood, D. (2012). Standardized precipitation index user guide. *World Meteorological Organization Geneva, Switzerland*.



- Thomson, A. M., Calvin, K. V., Smith, S. J., Kyle, G. P., Volke, A., Patel, P., ... Edmonds, J. A. (2011). RCP4.5: a pathway for stabilization of radiative forcing by 2100. *Climatic Change*, 109(1–2), 77. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0151-4>
- Ureña Mora, P., Alfaro Martínez, E. J., Alfaro, S., & Javier, F. (2016). Propuestas metodológicas para el rellenado de datos ausentes en series de tiempo geofísicas. Guía Práctica de uso. Retrieved from <http://repositorio.ucr.ac.cr/handle/10669/28888>
- Velasco, I., Ochoa, L., & Gutiérrez, C. (2005). Sequía, un problema de perspectiva y gestión. *Región Y Sociedad*, 17(34), 35–71.
- Villatoro, M., Henríquez, C., & Sancho, F. (2008). Comparación de los interpoladores IDW y Kriging en la variación espacial de pH, Ca, CICE y P del suelo. *Agronomía Costarricense*, 32(1).
- Vuuren, D. P., Stehfest, E., Elzen, M. G., Kram, T., Vliet, J., Deetman, S., ... Beltran, A. M. (2011). RCP2. 6: exploring the possibility to keep global mean temperature increase below 2 C. *Climatic Change*, 109(1–2), 95–116.
- Vuuren, D. P. van, Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., ... Rose, S. K. (2011). The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*, 109(1–2), 5. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>
- Wang, X. L., & Feng, Y. (2010). RHtestsV3 user manual. *Climate Research Division. Atmospheric Science and Technology Directorate. Science and Technology Branch, Environment Canada*, 24. Retrieved from http://etccdi.pacificclimate.org/RHtest/RHtestsV4_UserManual_10Dec2014.pdf
- Wilhite, D. A., Hayes, M. J., & Svoboda, M. D. (2000). Drought monitoring and assessment: status and trends in the United States. In *Drought and drought mitigation in Europe* (pp. 149–160). Springer. Retrieved from https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-015-9472-1_11

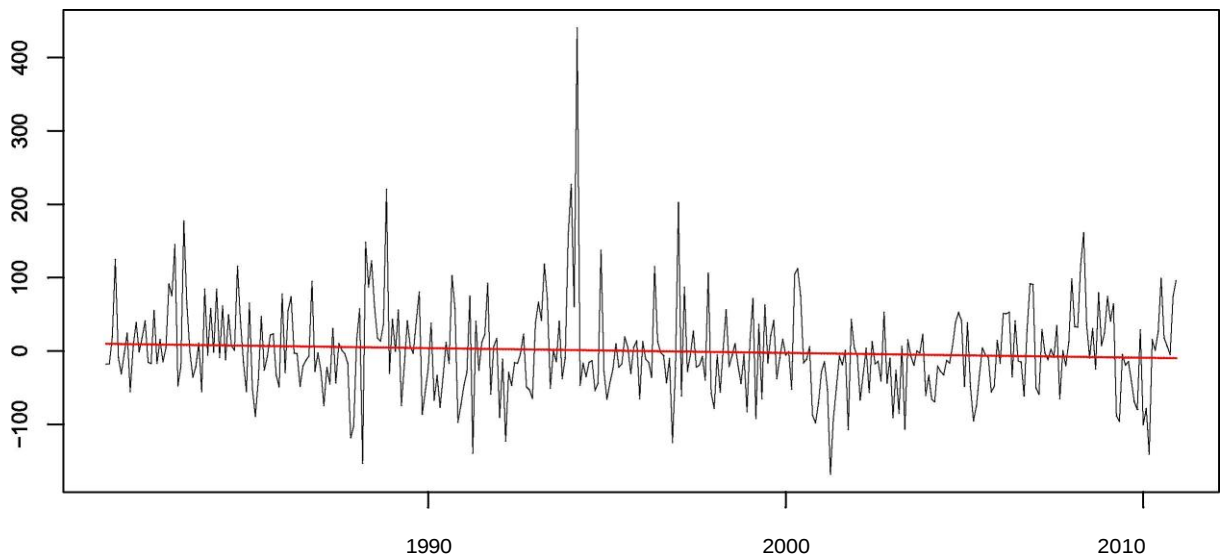


Wu, H., Hayes, M. J., Weiss, A., & Hu, Q. (2001). An evaluation of the Standardized Precipitation Index, the China-Z Index and the statistical Z-Score. *International Journal of Climatology*, 21(6), 745–758.

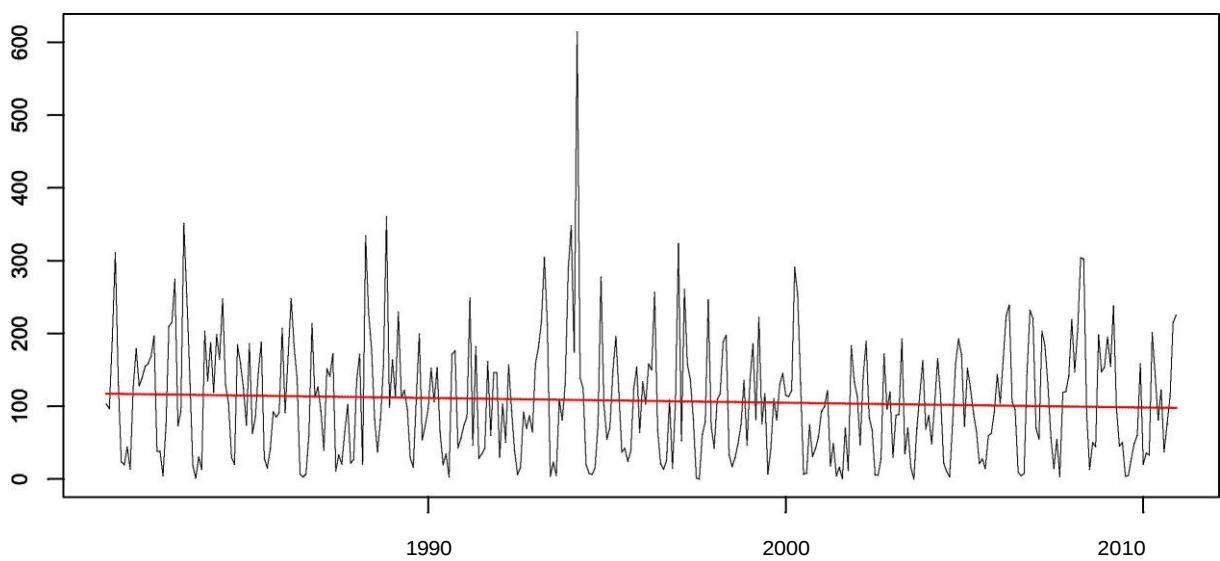
VII. ANEXOS

M0001 INGUINCHO

Base anomaly series and regression fit

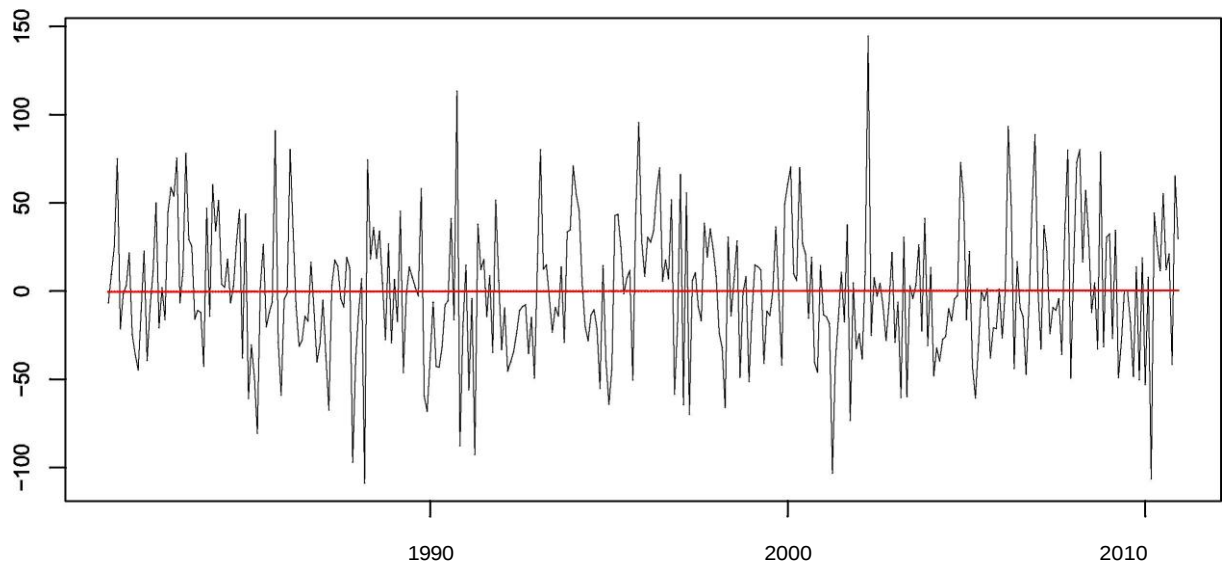


Base series and regression fit

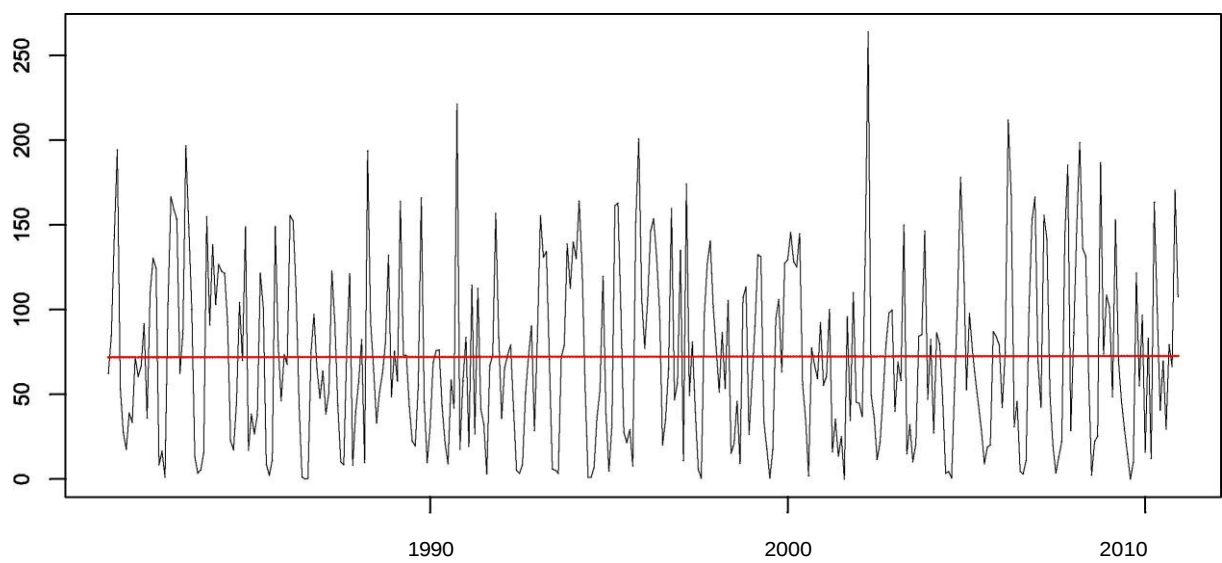


M0002 LA TOLA

Base anomaly series and regression fit

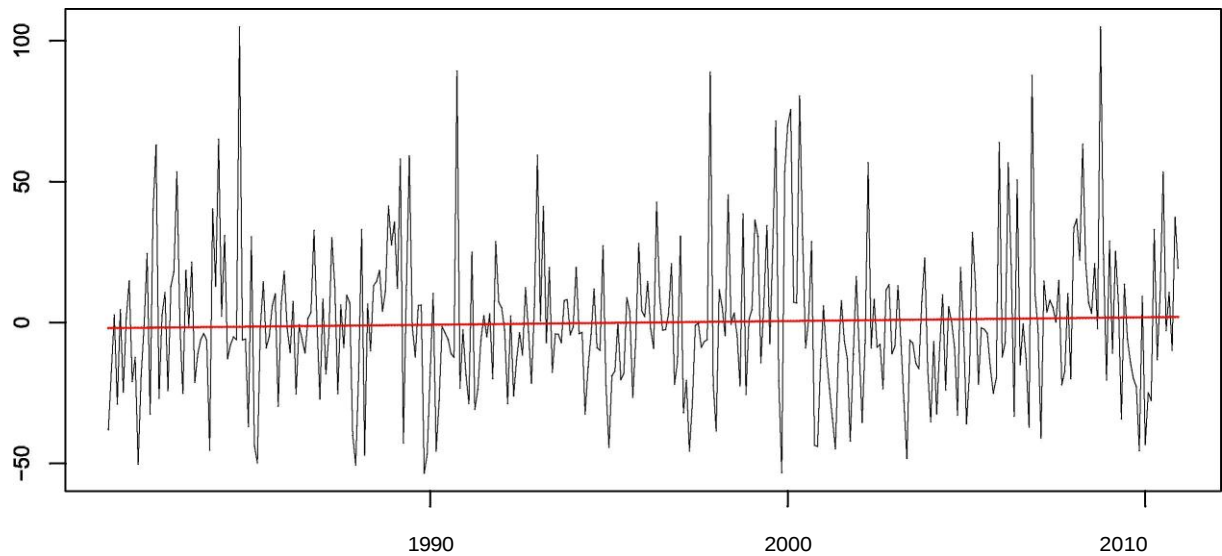


Base series and regression fit

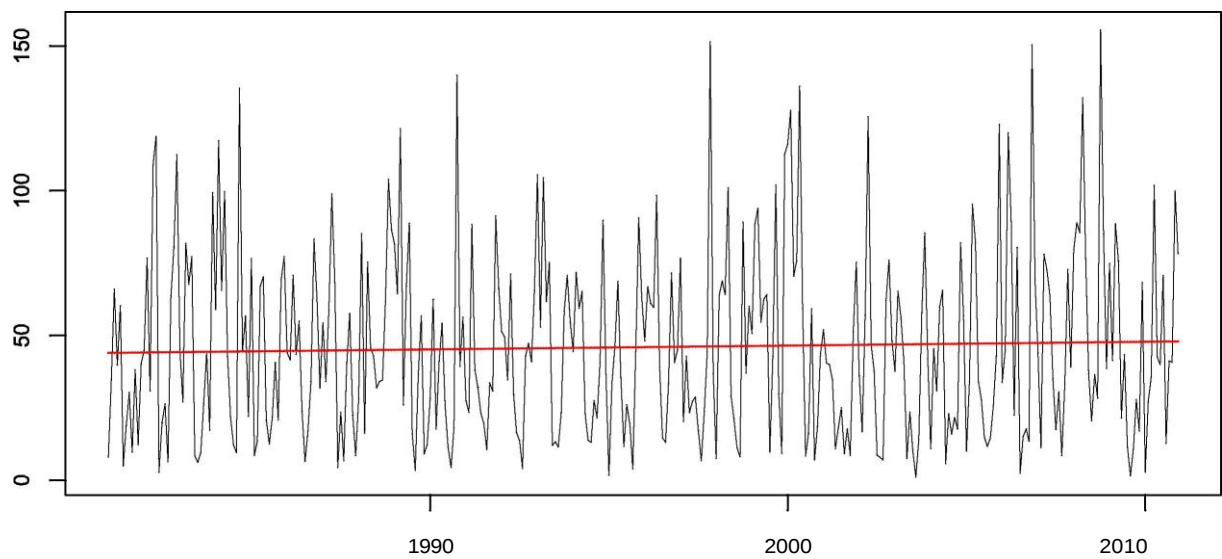


M0004 RUMIPAMBA-SALSED

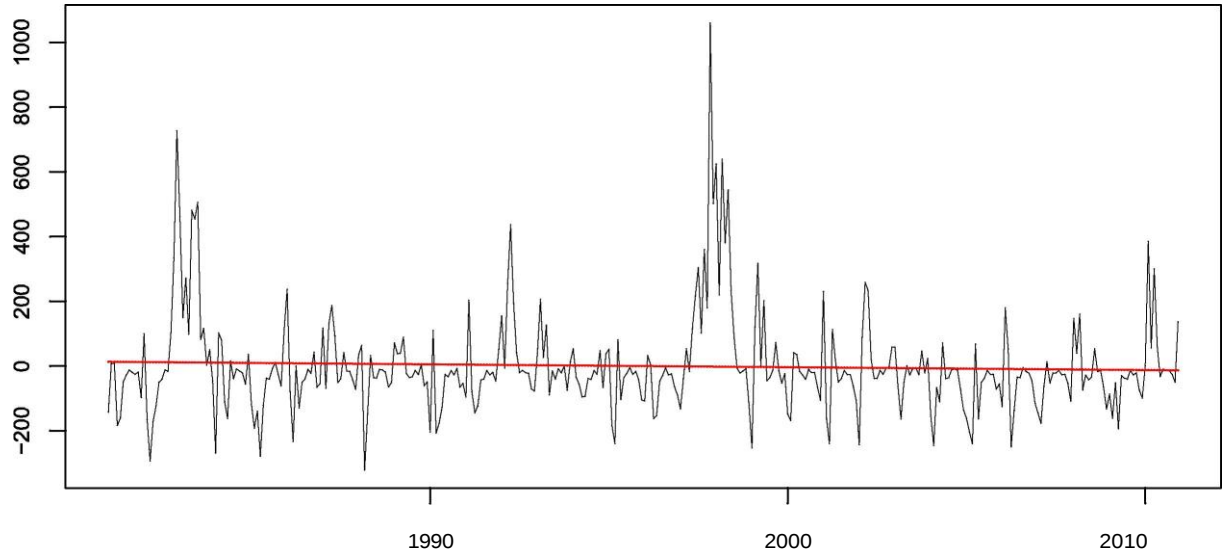
Base anomaly series and regression fit



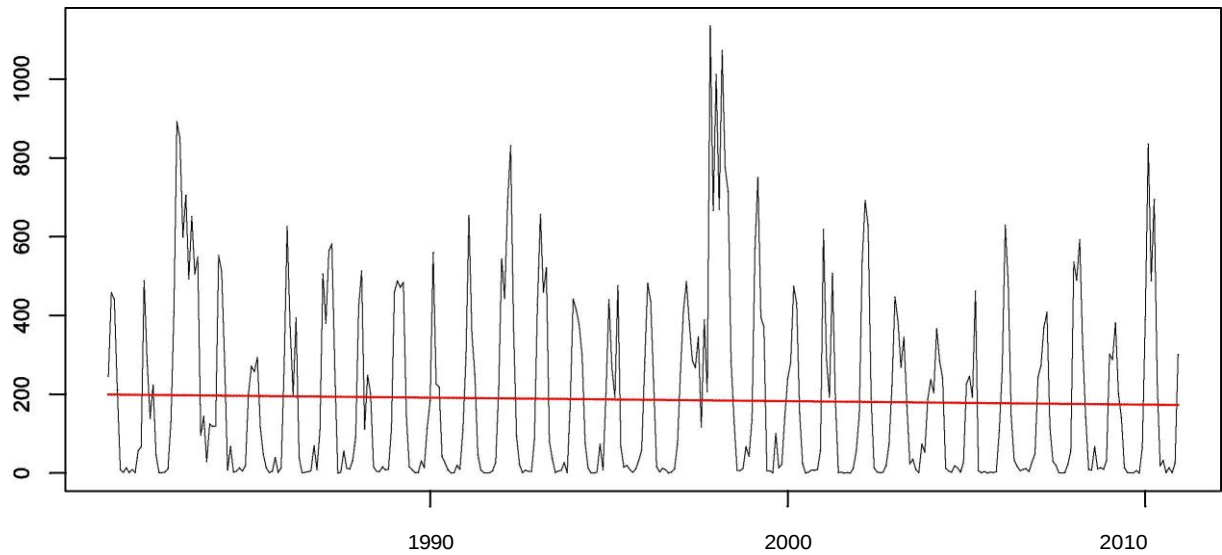
Base series and regression fit



Base anomaly series and regression fit

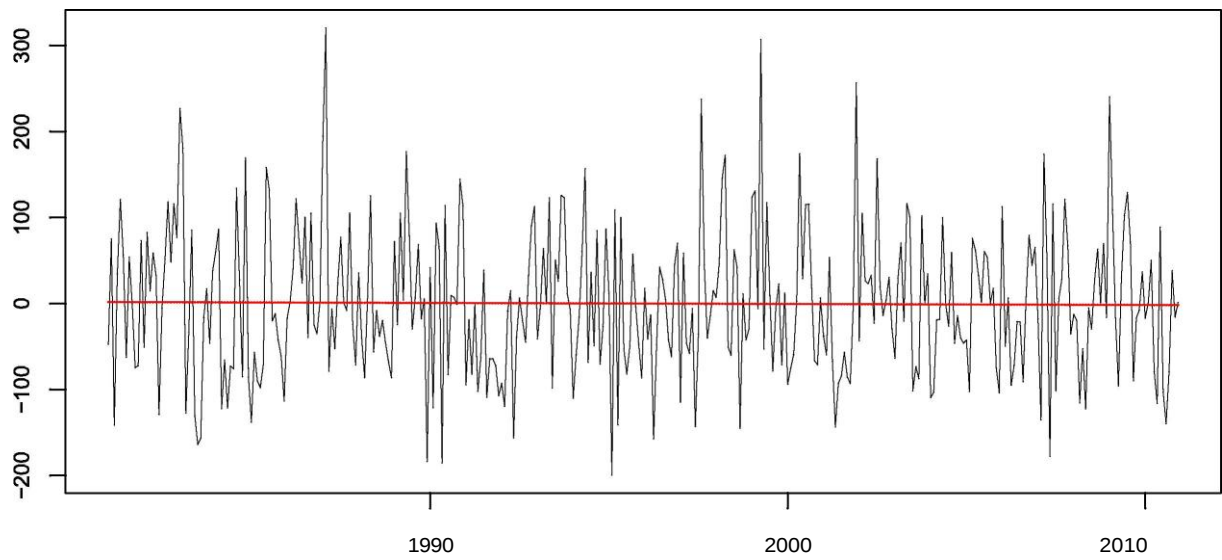


Base series and regression fit

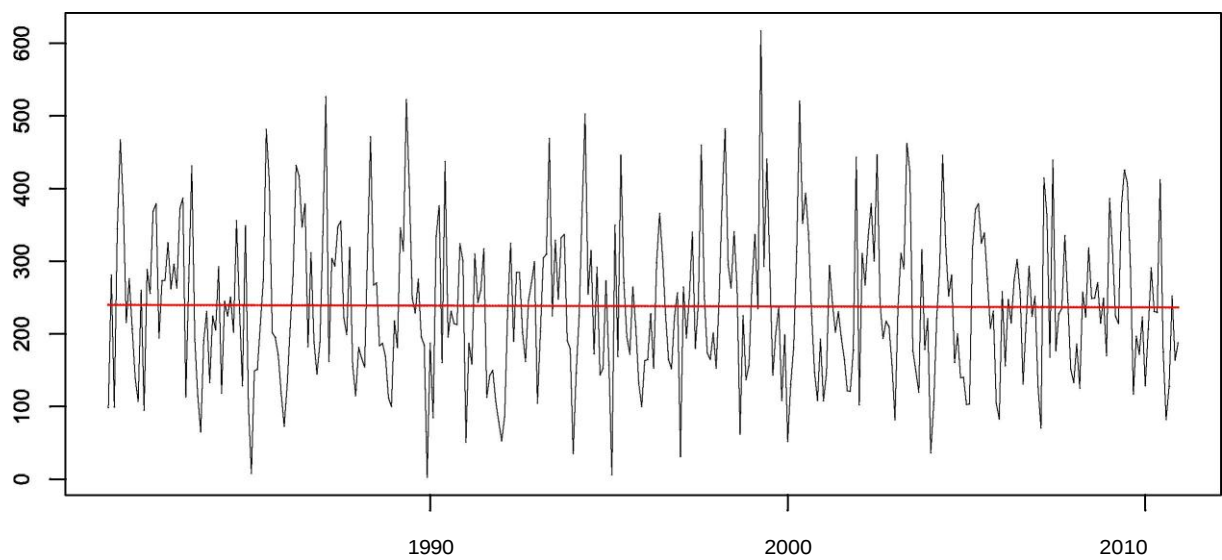


M0007 NUEVA ROCAFUERTE

Base anomaly series and regression fit

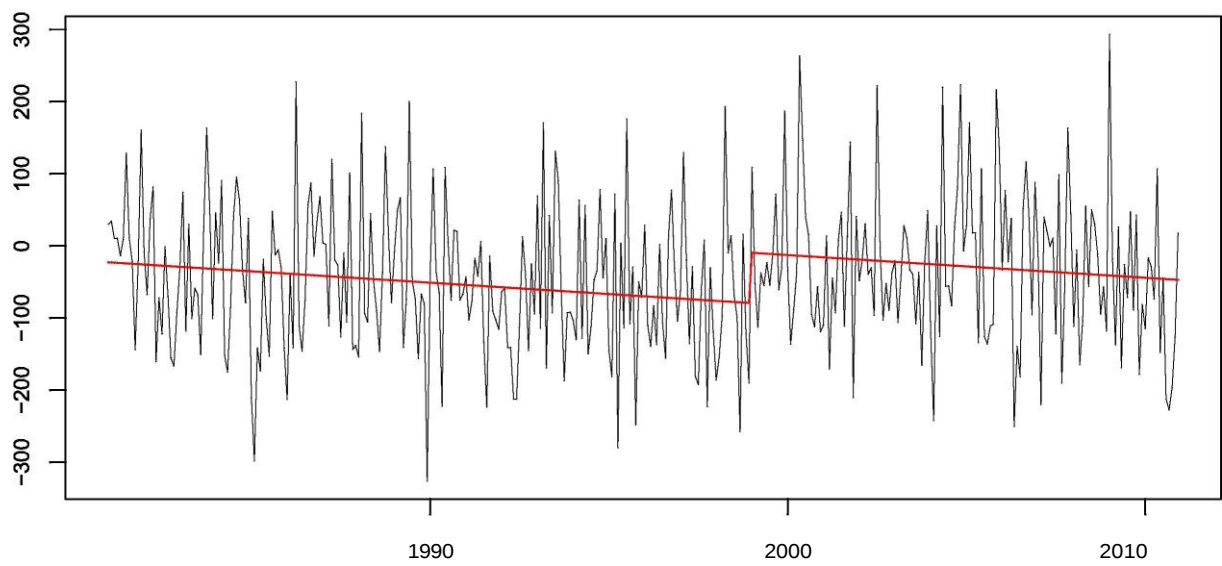


Base series and regression fit

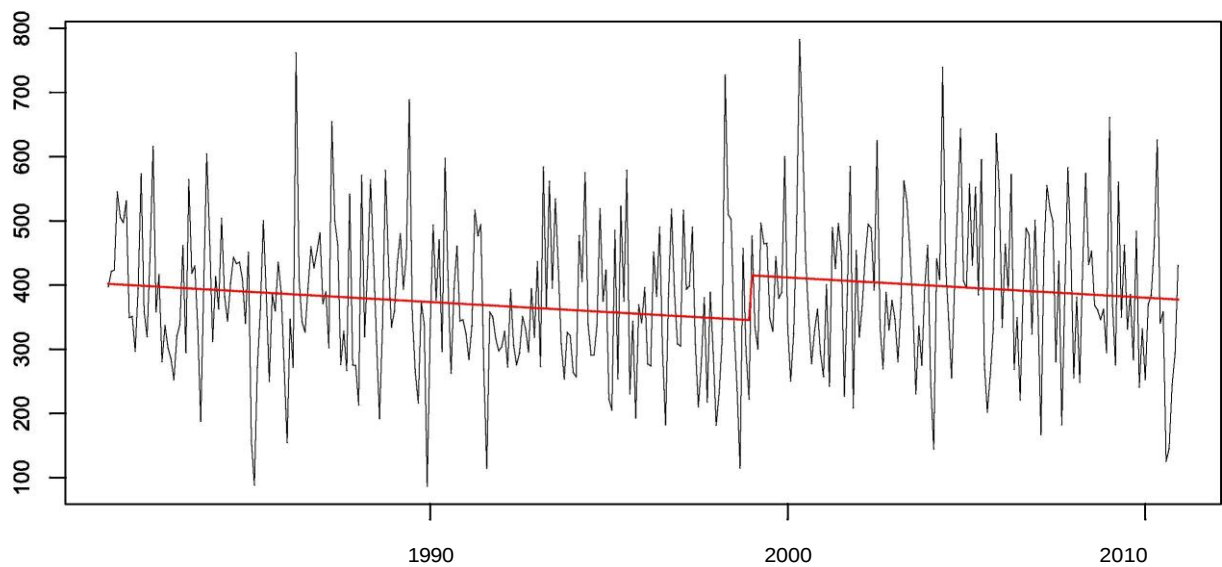


M0008 PUYO

Base anomaly series and regression fit

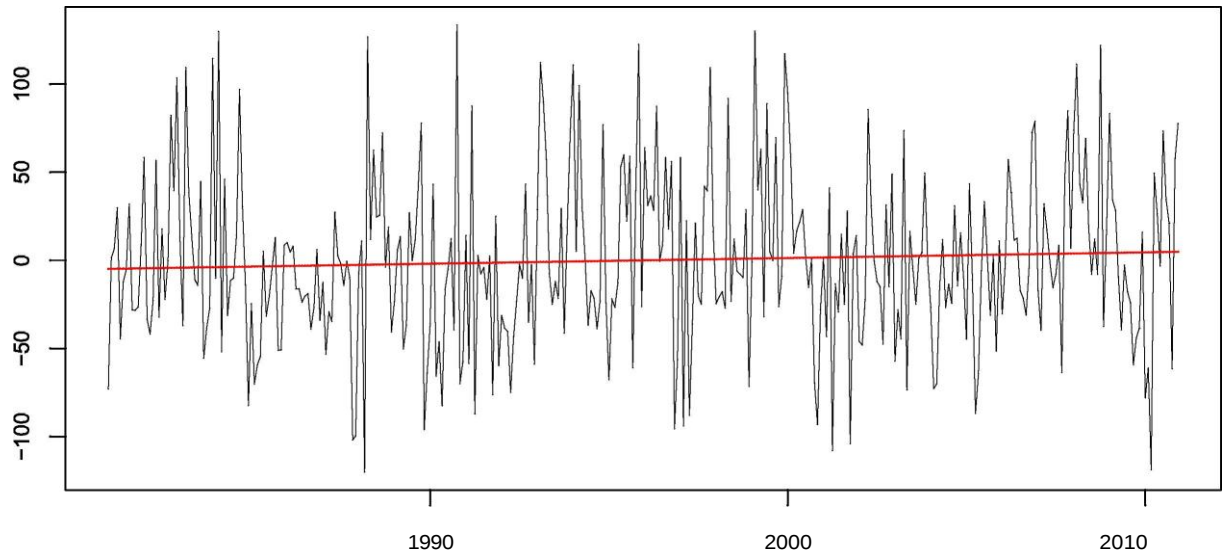


Base series and regression fit

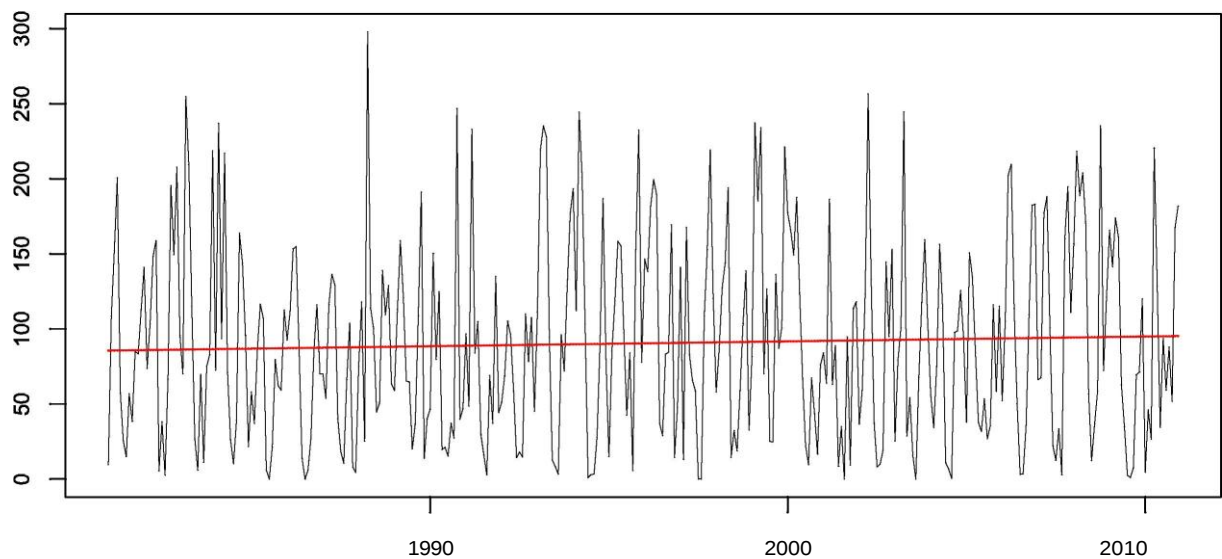


M0024 QUITO INAMHI

Base anomaly series and regression fit

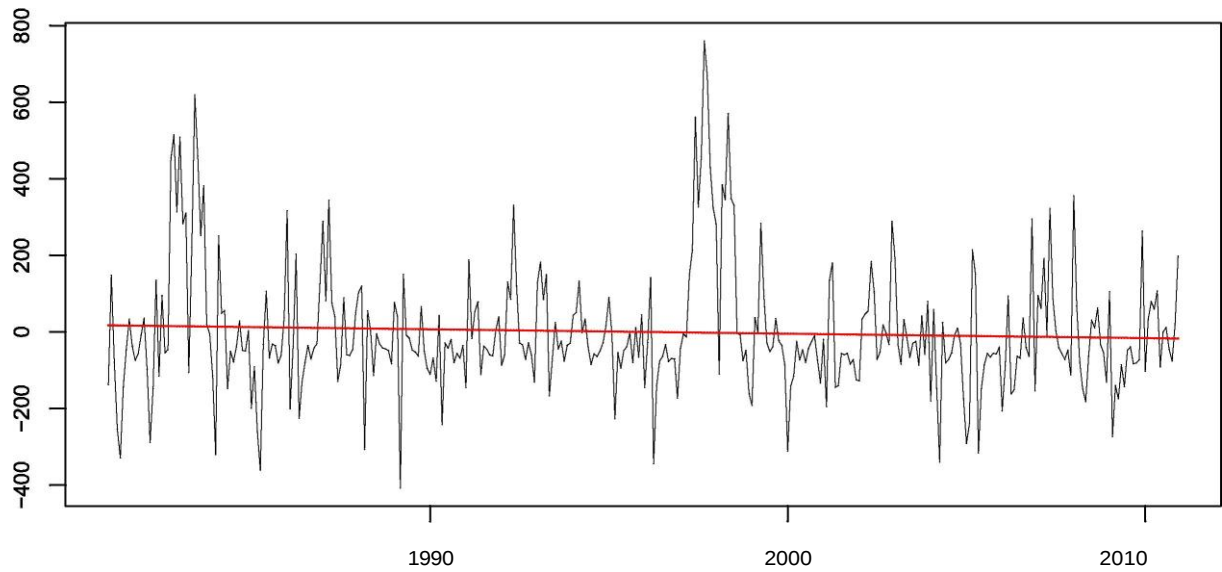


Base series and regression fit

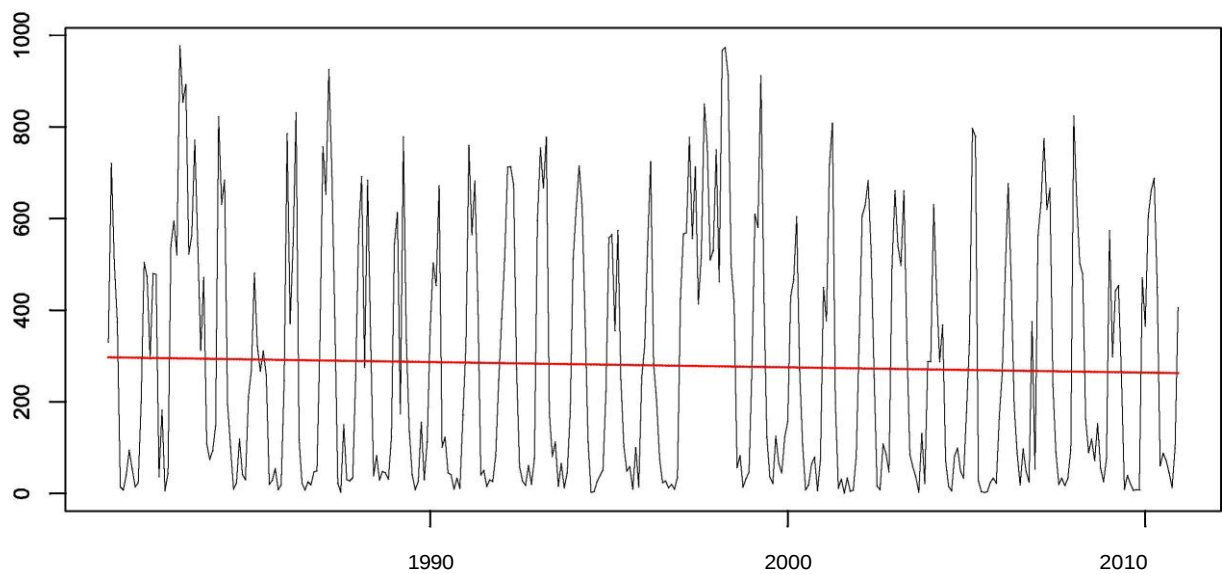


M0025 LA CONCORDIA

Base anomaly series and regression fit

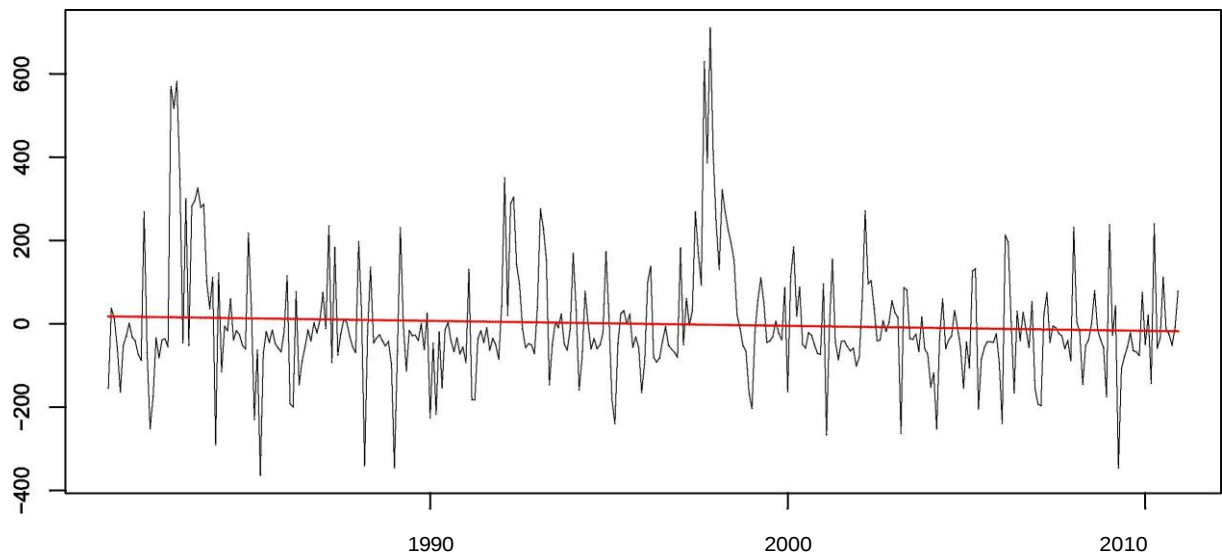


Base series and regression fit

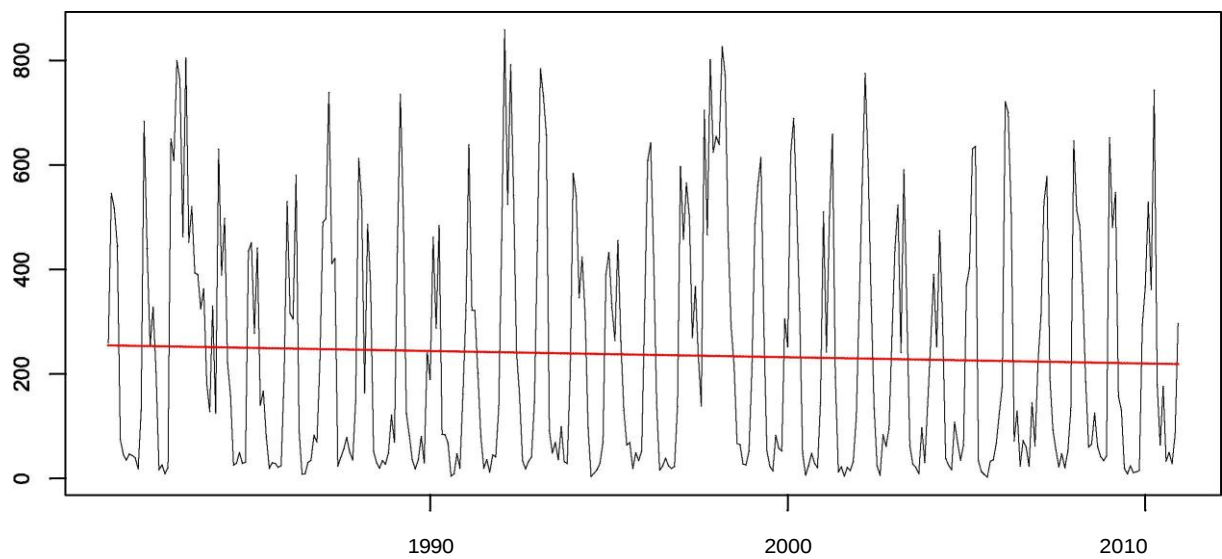


M0026 PUERTO OLLA

Base anomaly series and regression fit

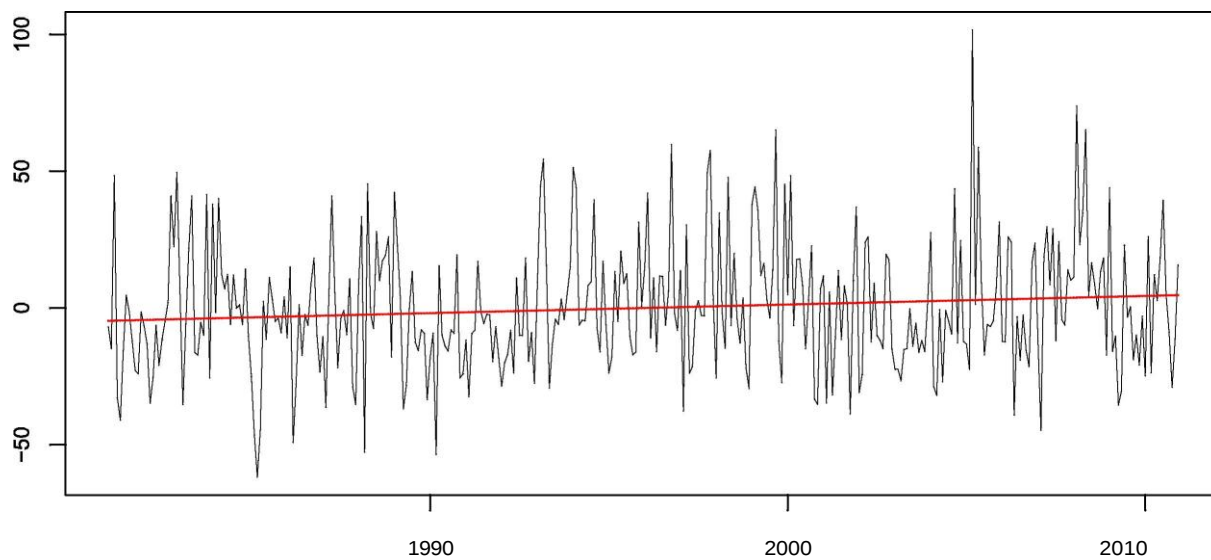


Base series and regression fit

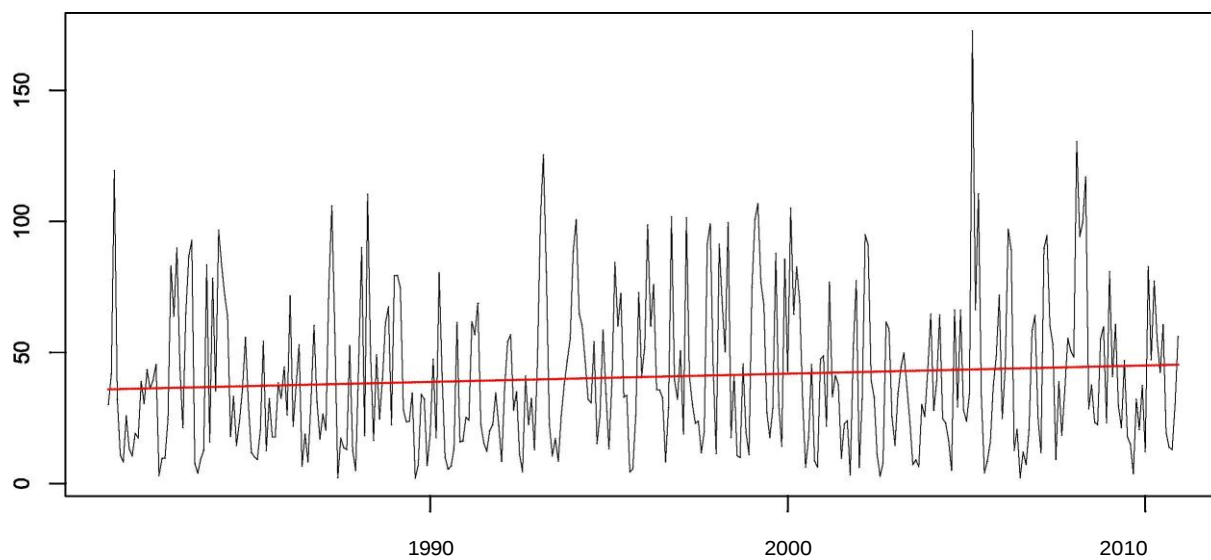




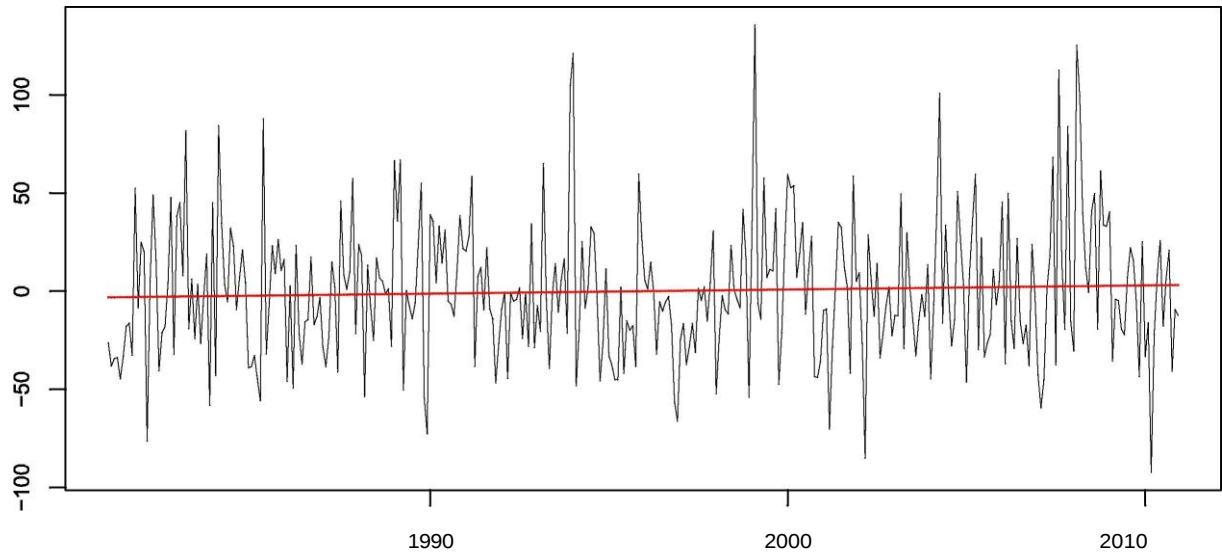
Base anomaly series and regression fit



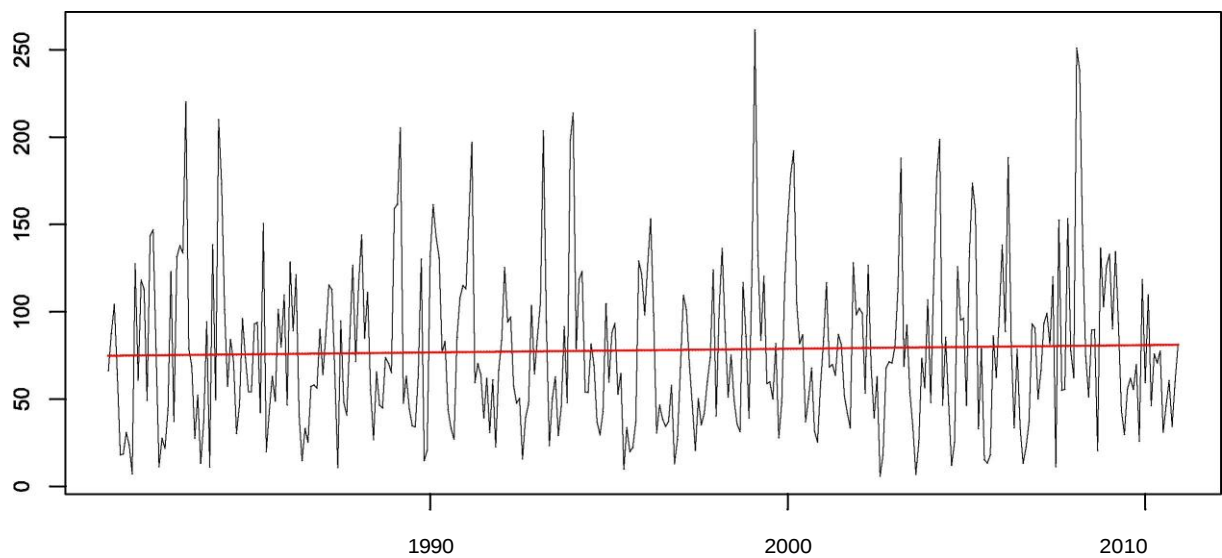
Base series and regression fit



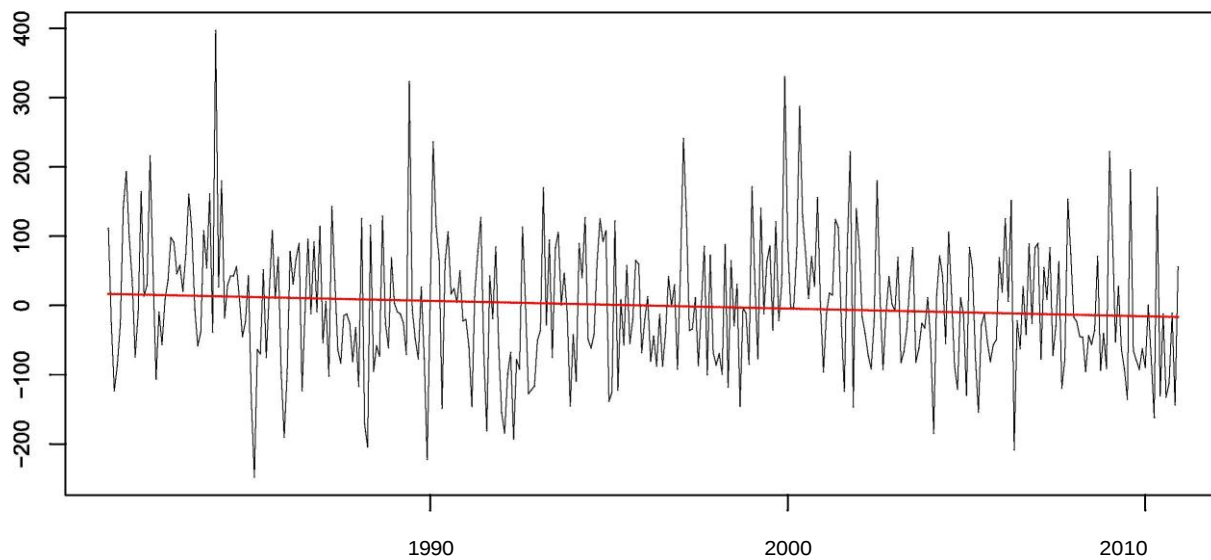
Base anomaly series and regression fit



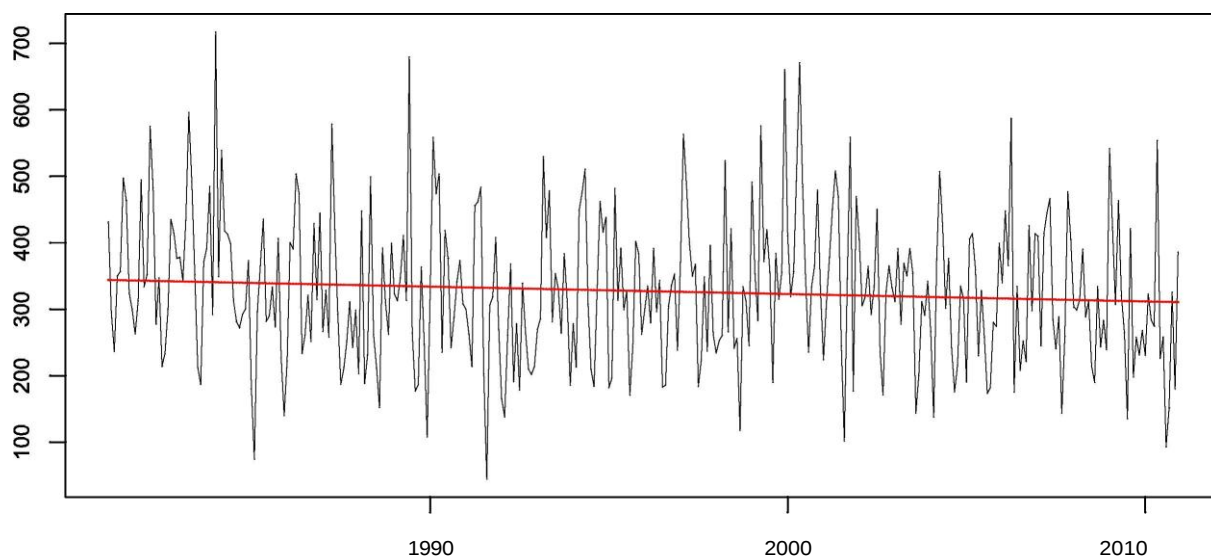
Base series and regression fit



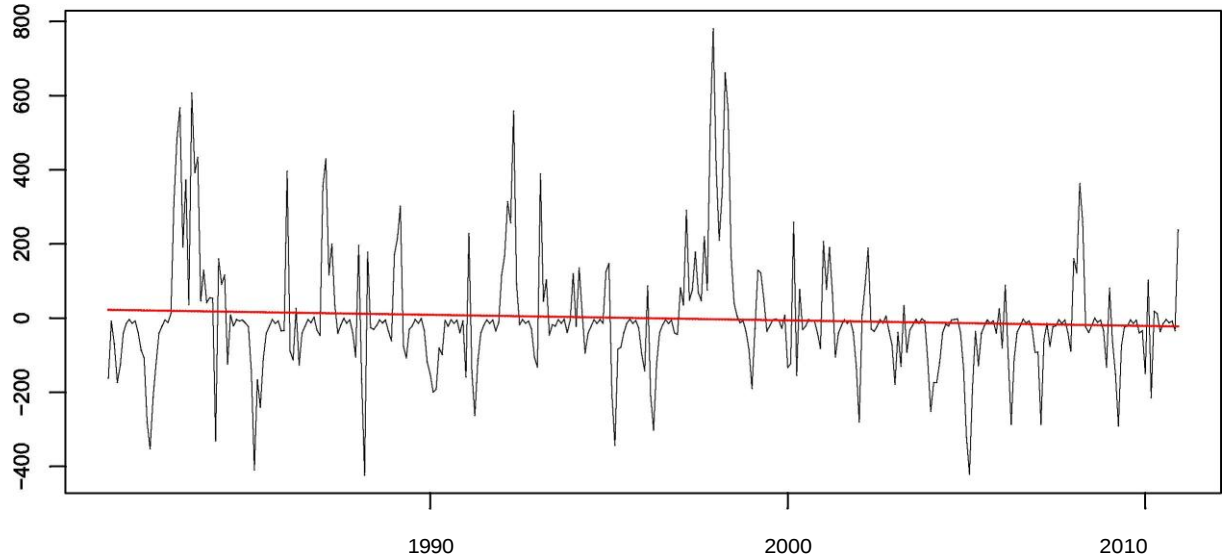
Base anomaly series and regression fit



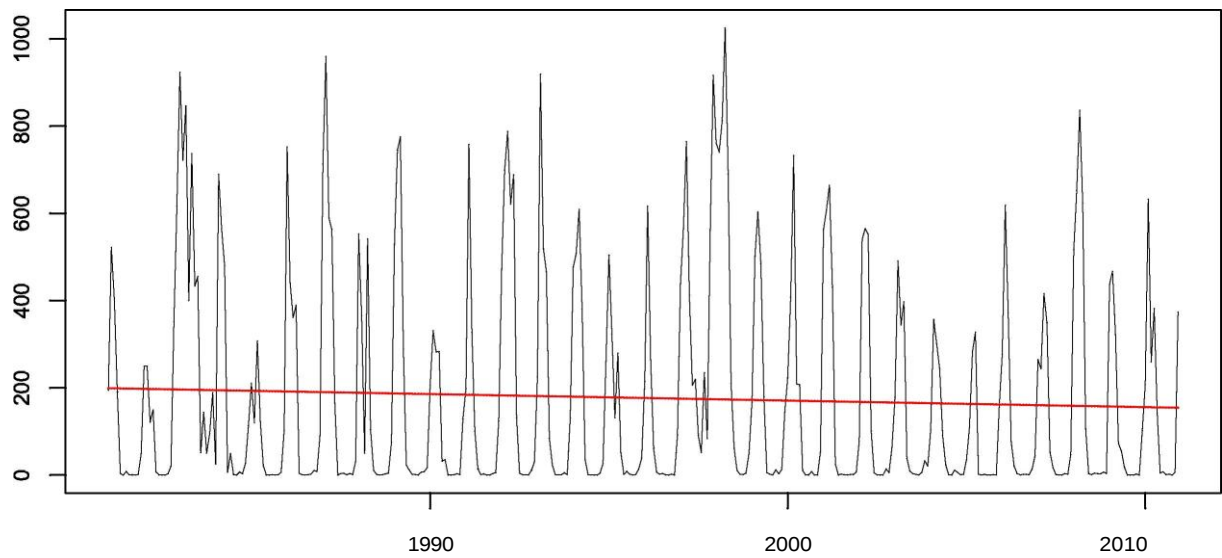
Base series and regression fit



Base anomaly series and regression fit

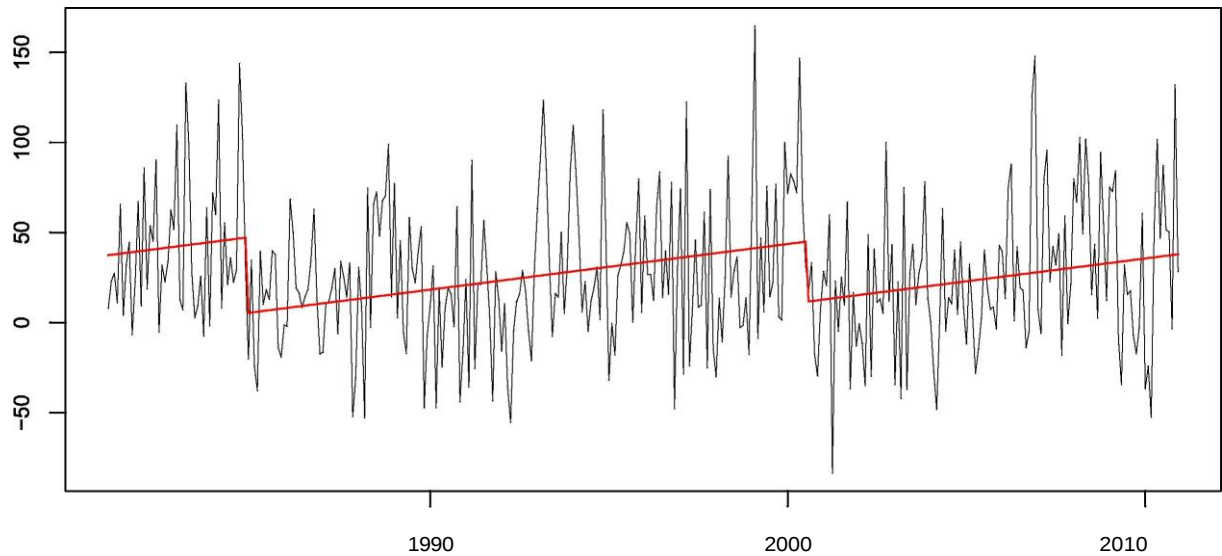


Base series and regression fit

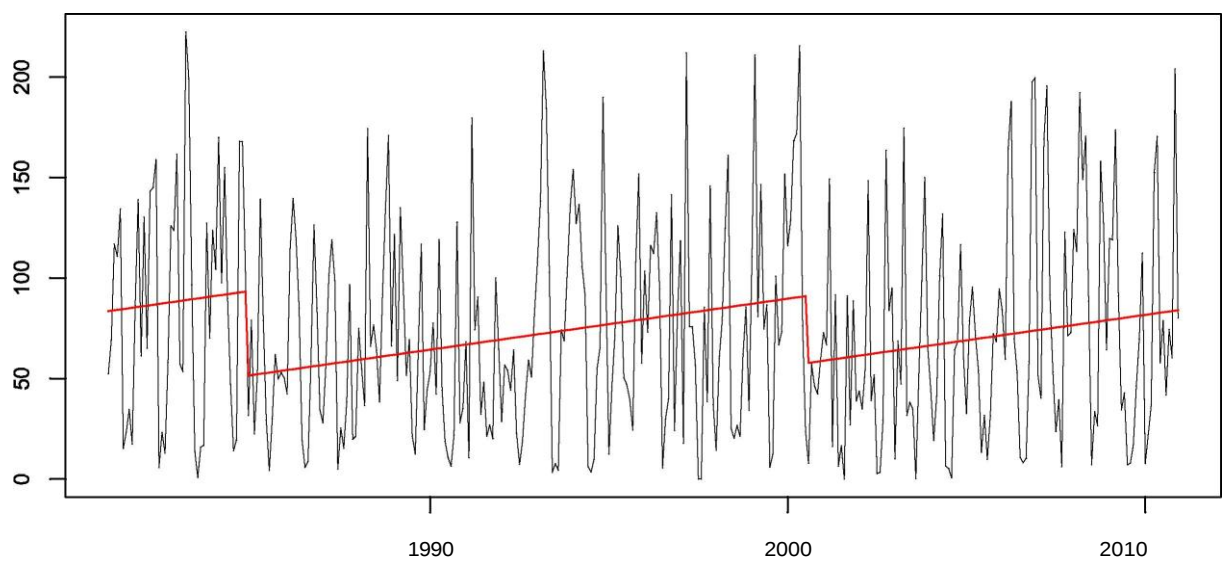


M0105 OTAVALO

Base anomaly series and regression fit

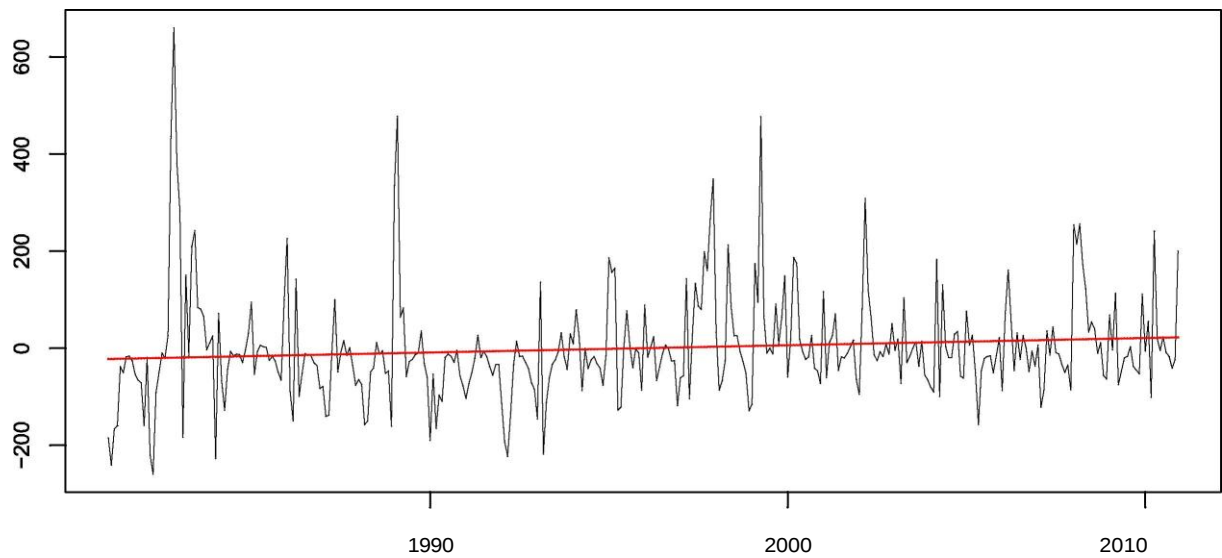


Base series and regression fit

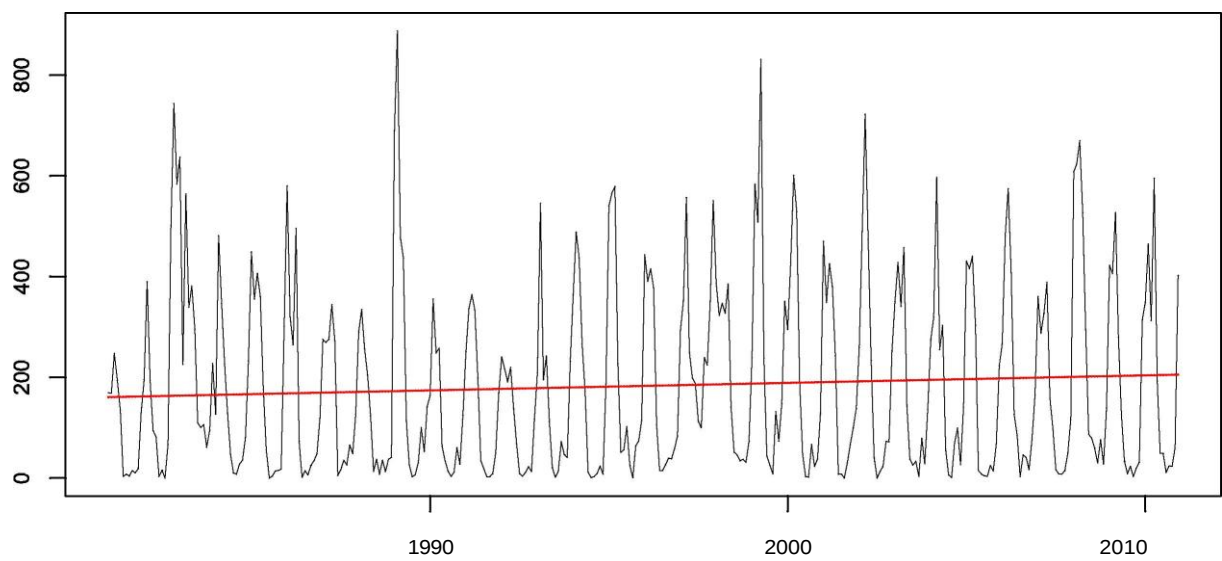


M0123 EL CORAZON

Base anomaly series and regression fit

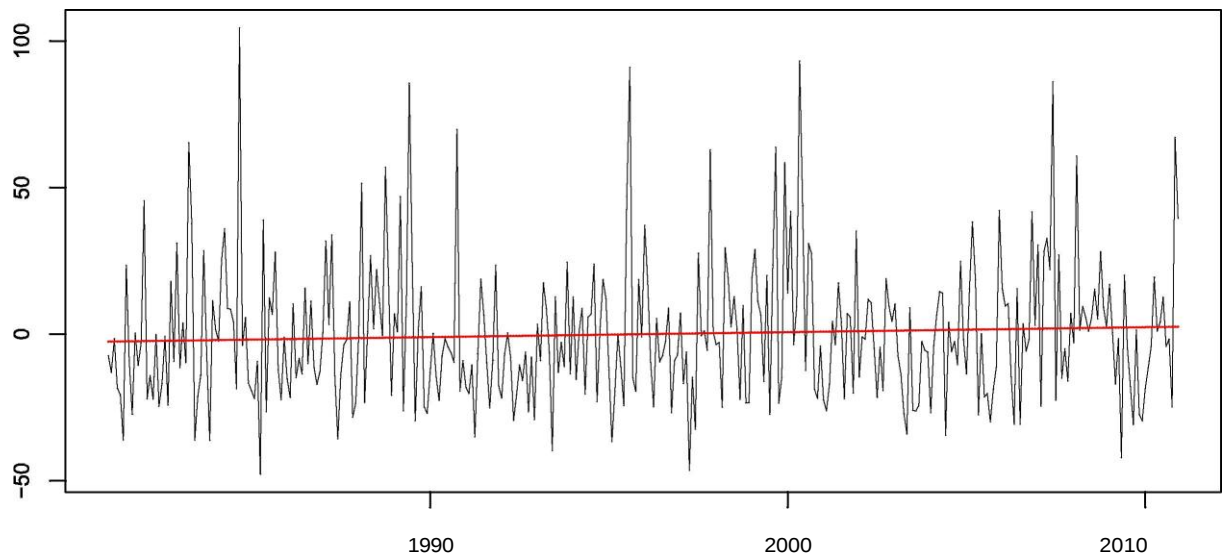


Base series and regression fit

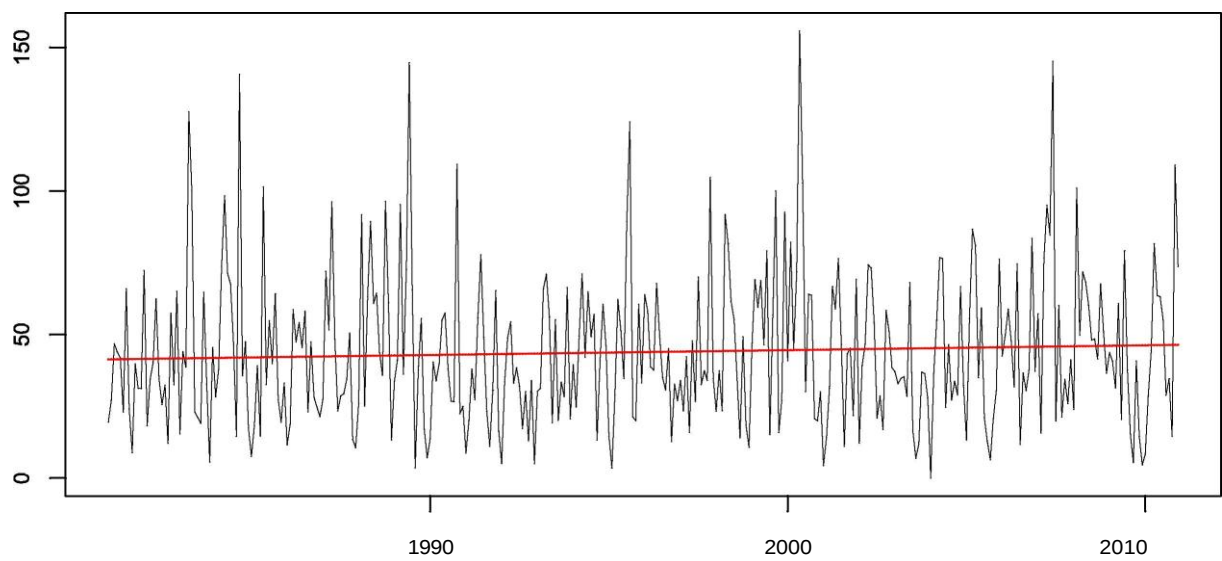


M0128 PEDRO FERMIN CEVALLOS-COLEGIO

Base anomaly series and regression fit

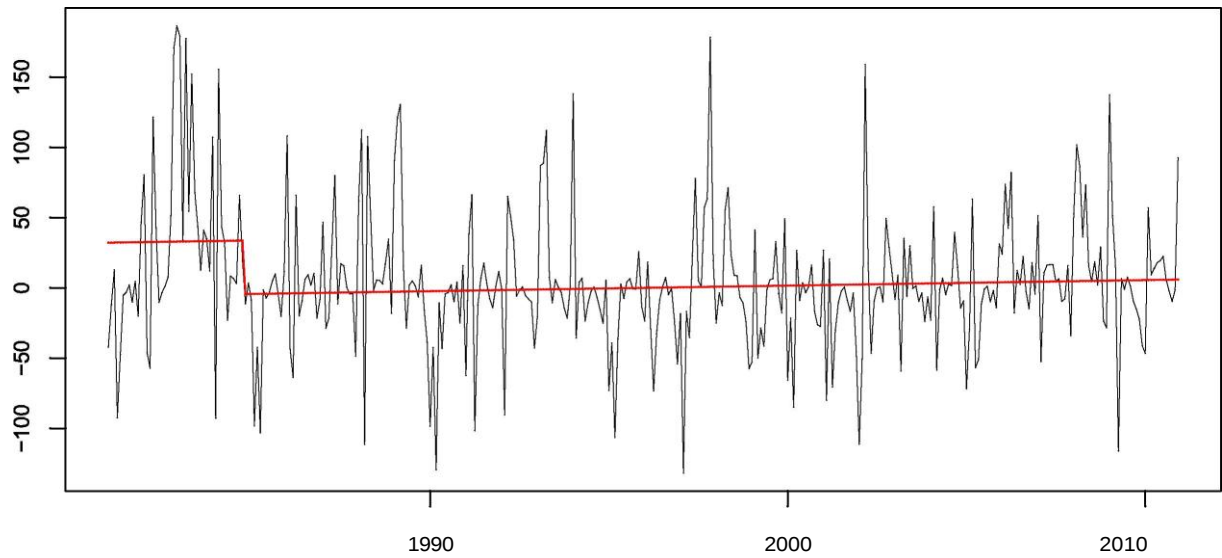


Base series and regression fit

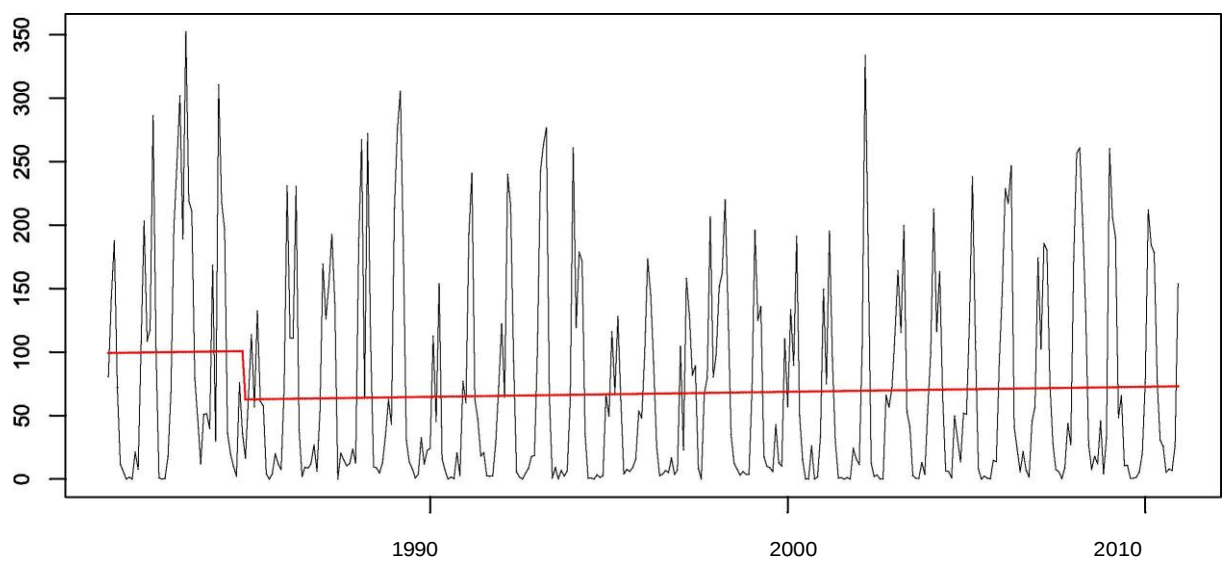


M0130 CHILLANES

Base anomaly series and regression fit

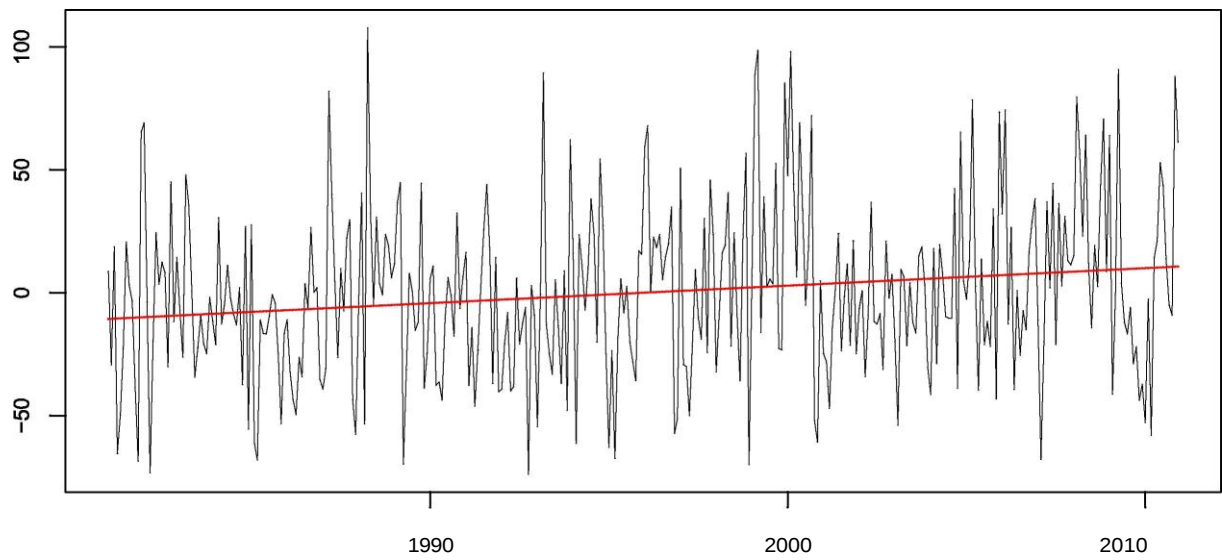


Base series and regression fit

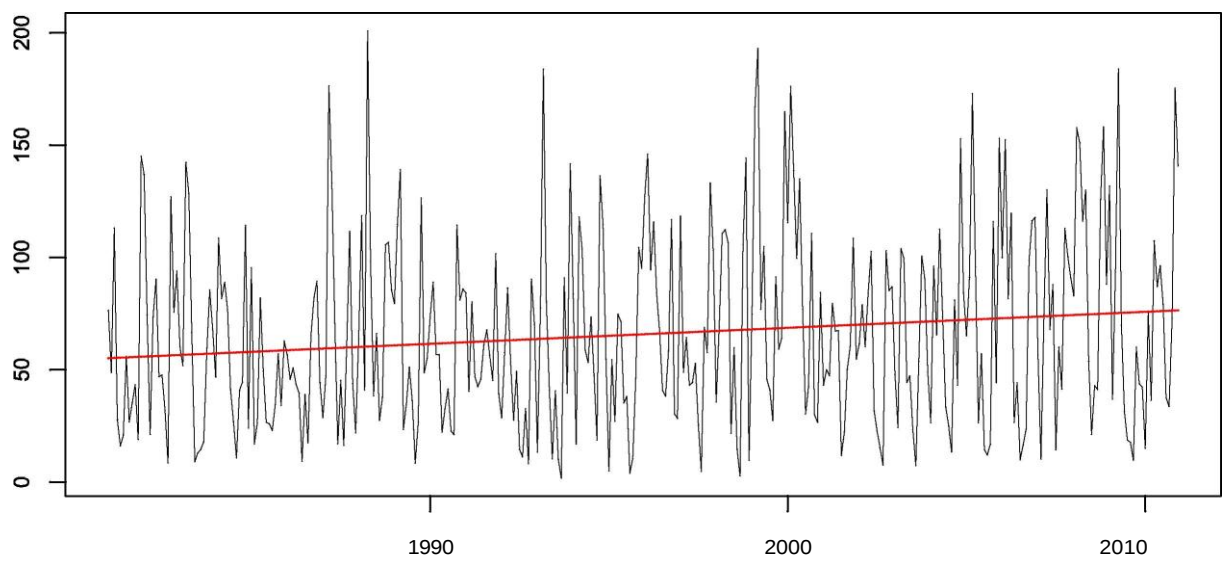


M0139 GUALACEO

Base anomaly series and regression fit

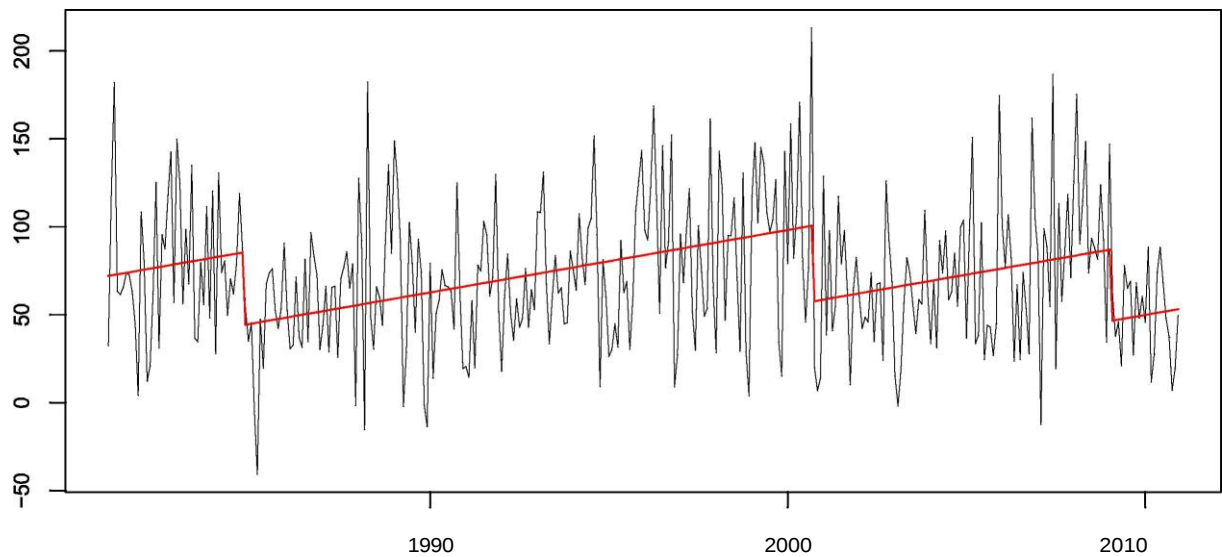


Base series and regression fit

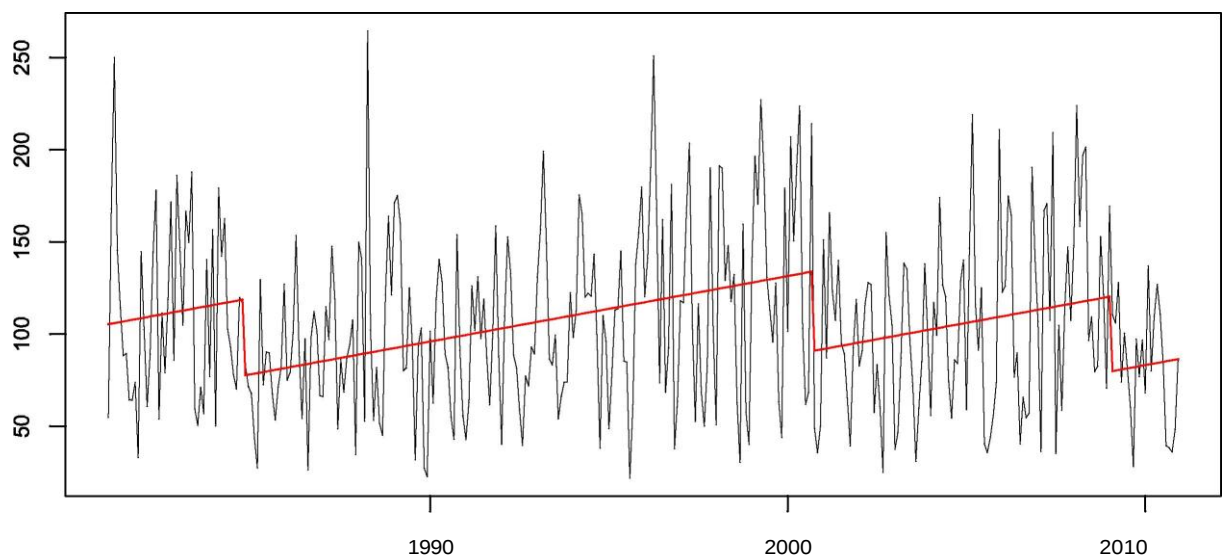


M0141 LABRADO

Base anomaly series and regression fit

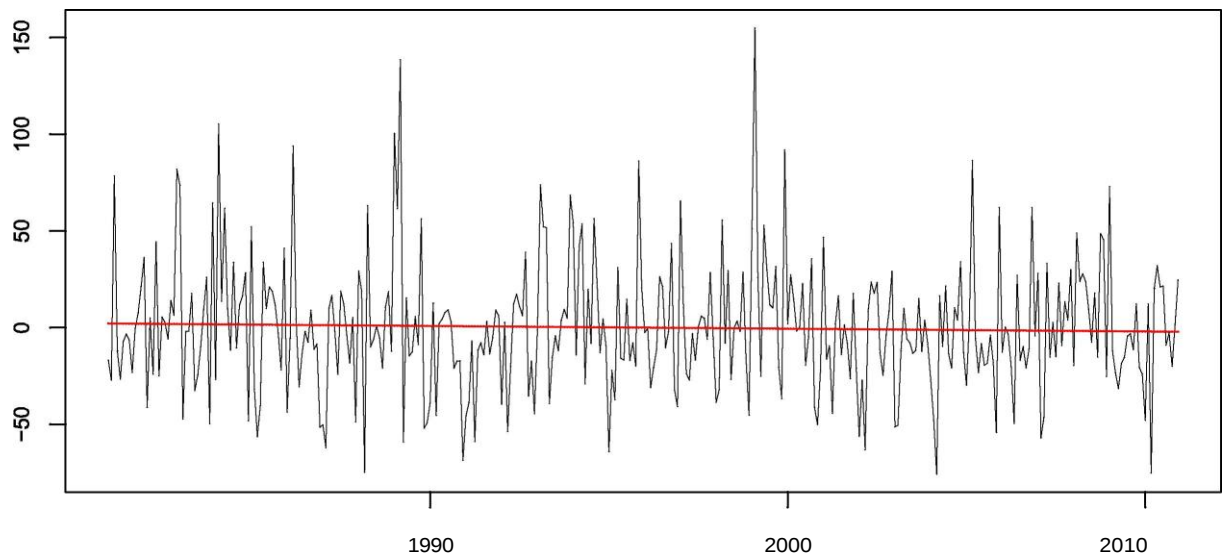


Base series and regression fit

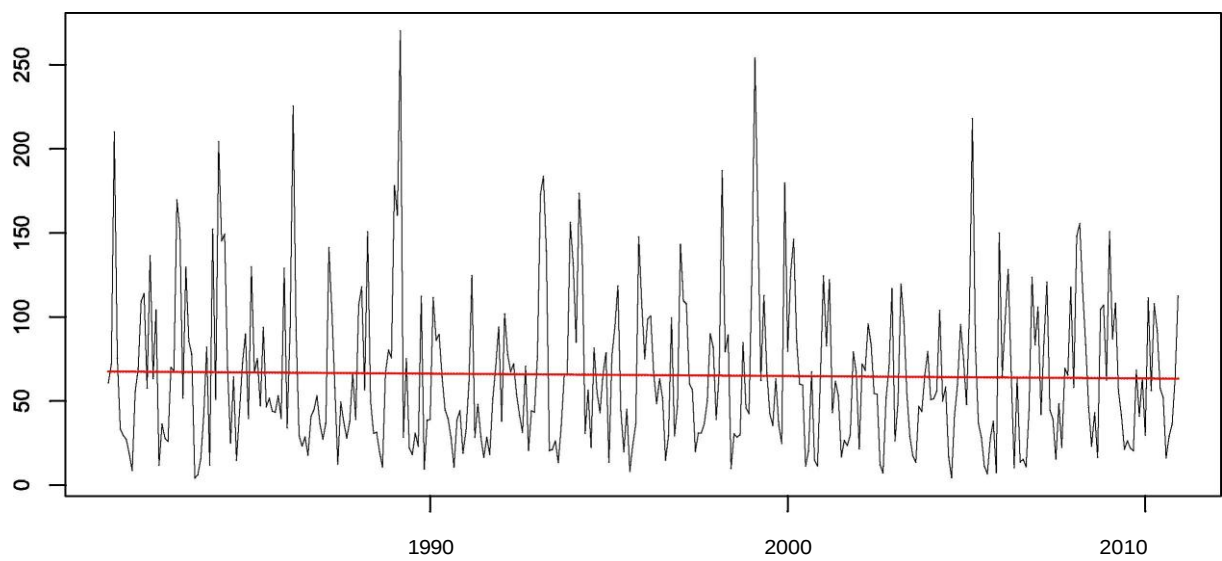


M0142 SARAGURO

Base anomaly series and regression fit

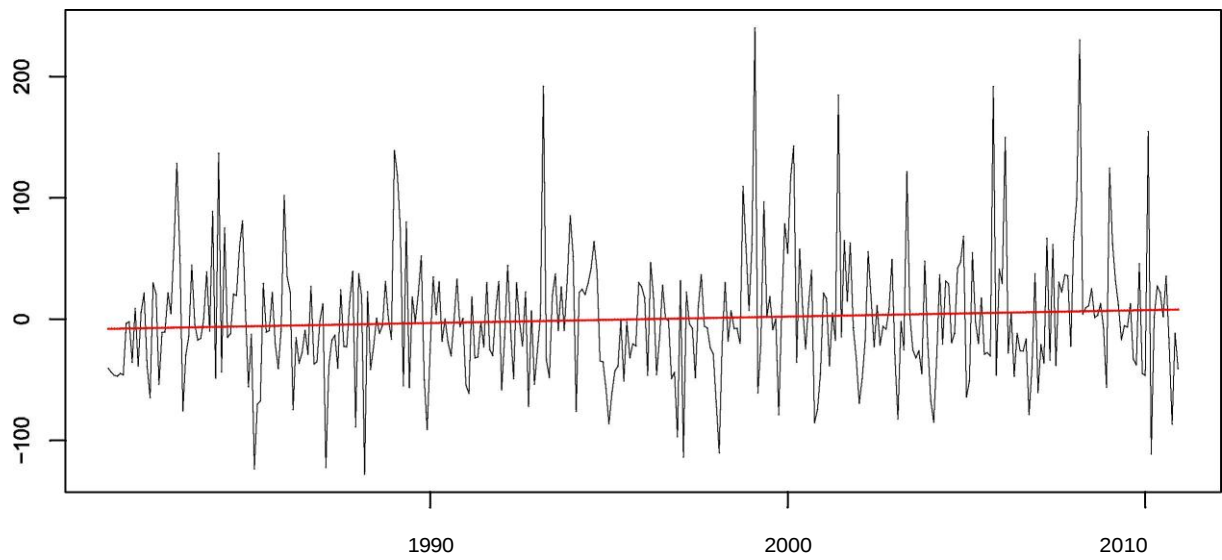


Base series and regression fit

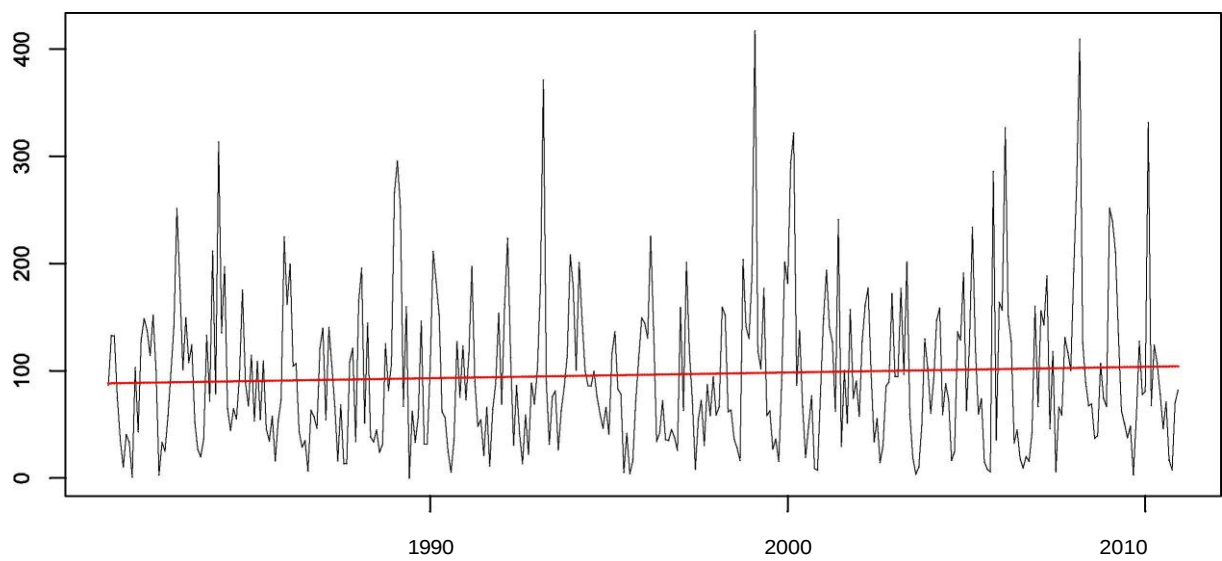


M0147 YANGANA

Base anomaly series and regression fit

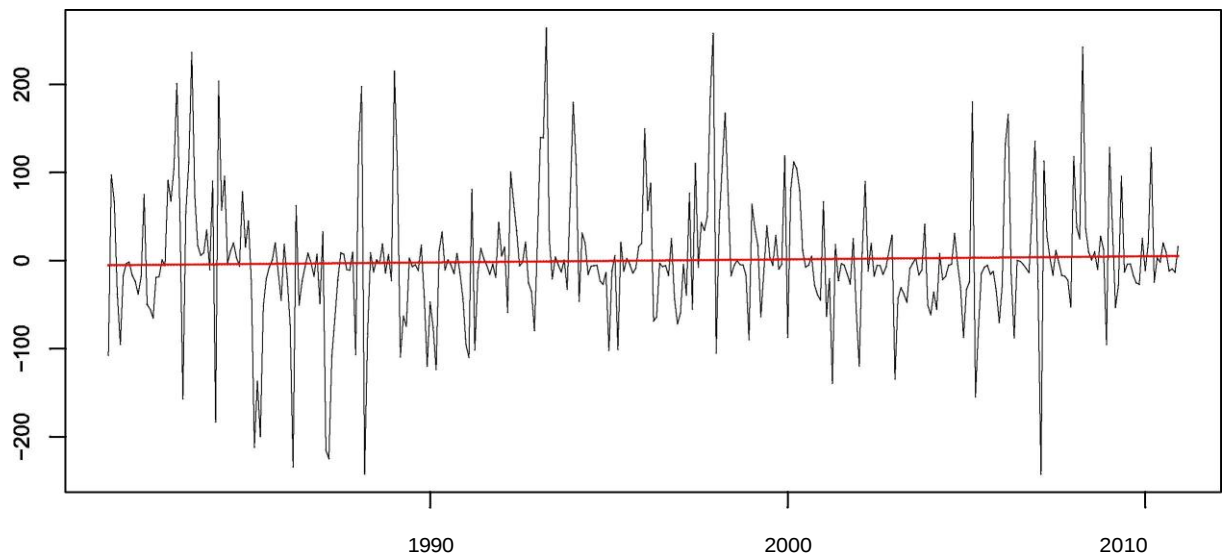


Base series and regression fit

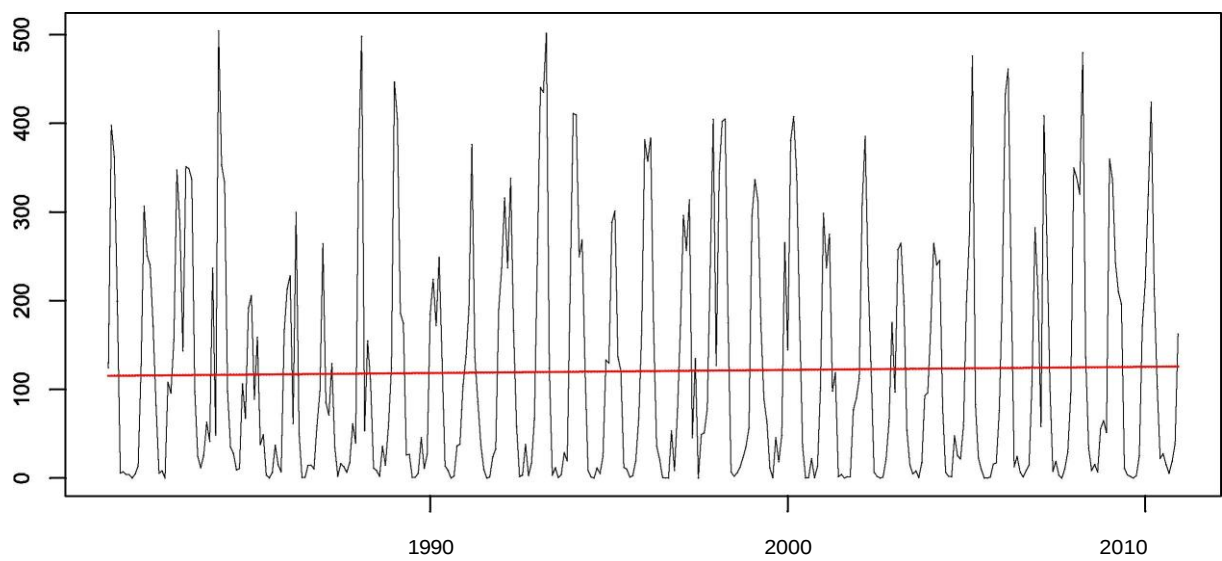


M0180 ZARUMA

Base anomaly series and regression fit

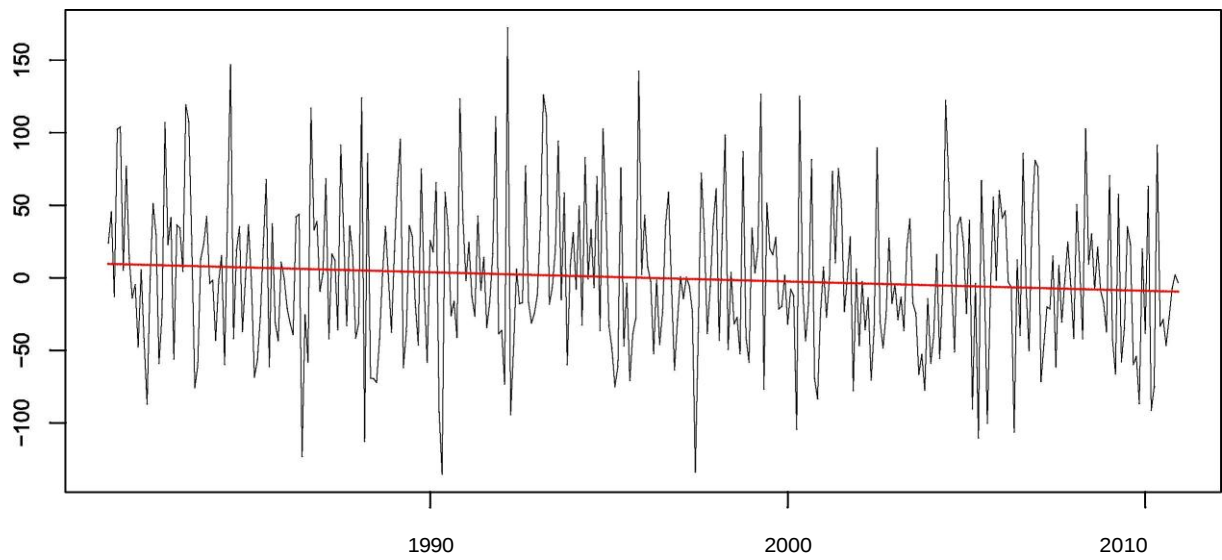


Base series and regression fit

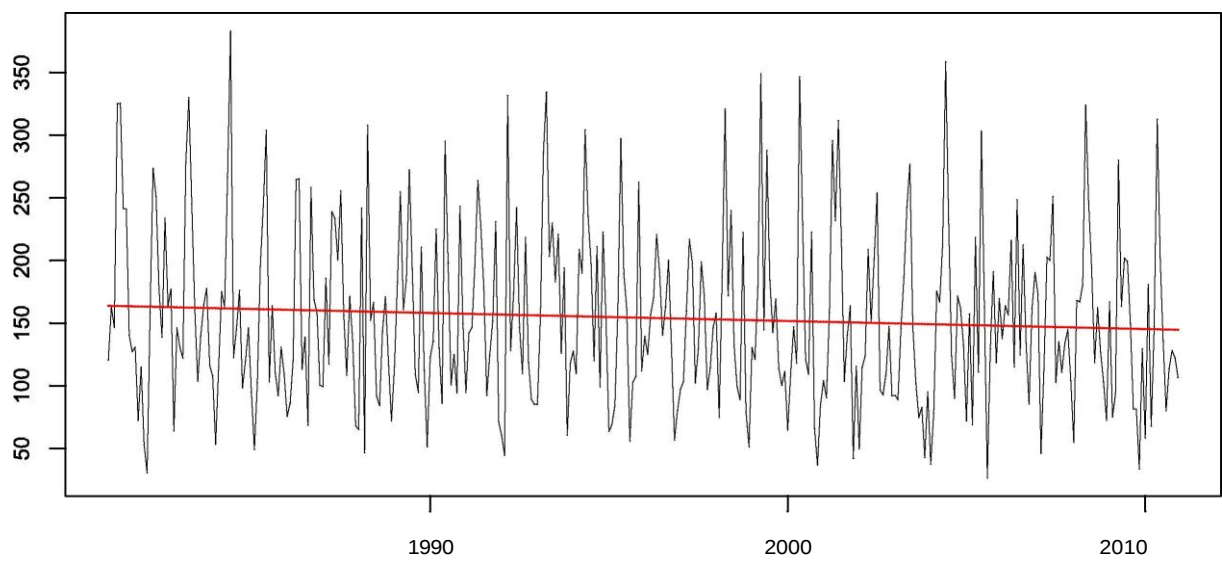


M0189 GUALQUIZA INAMHI

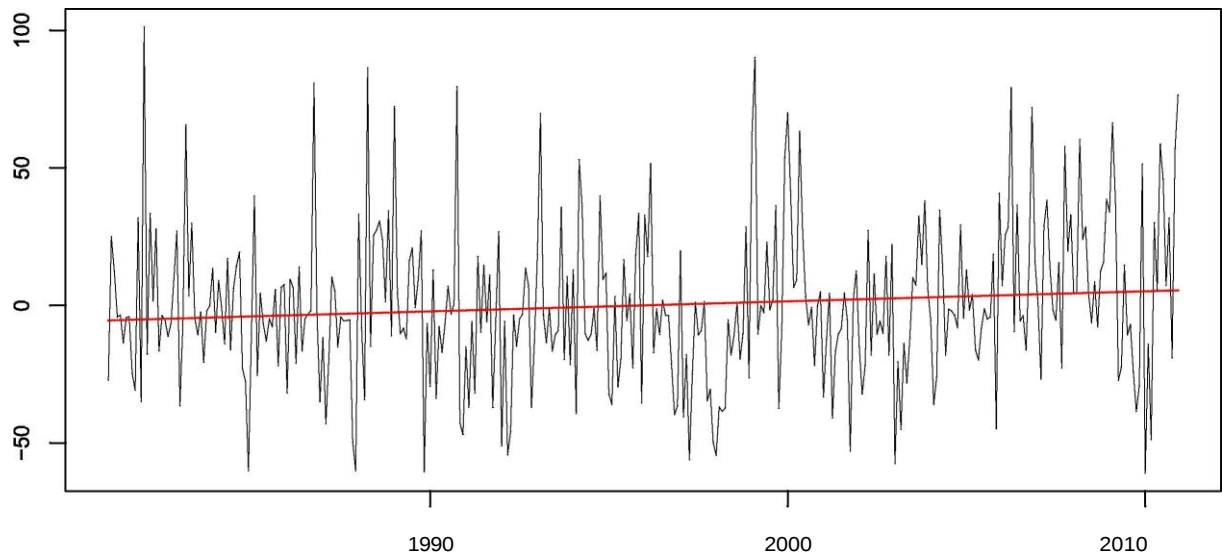
Base anomaly series and regression fit



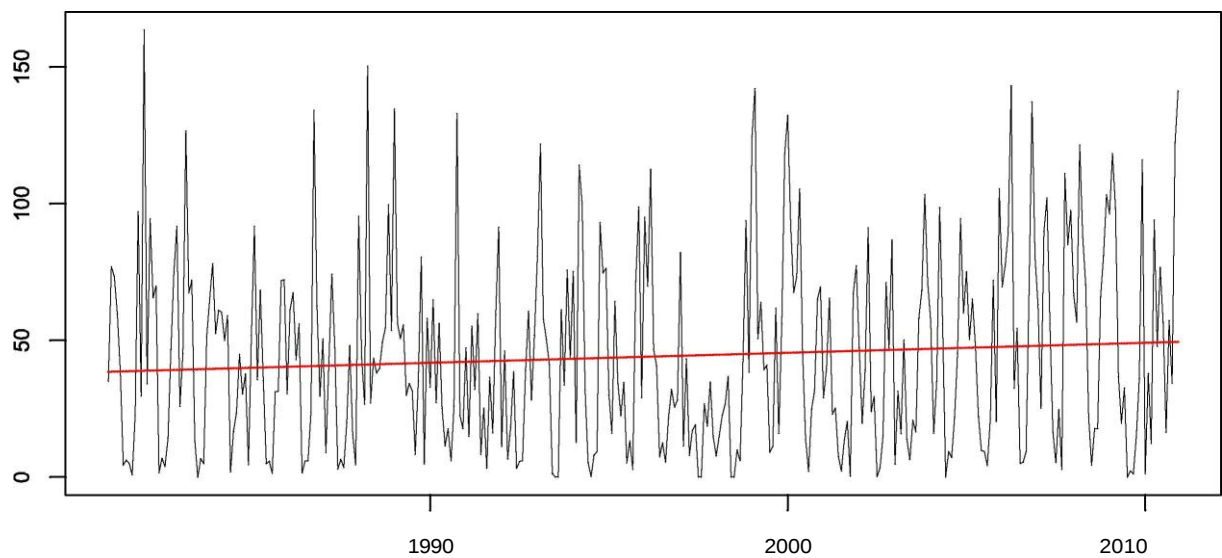
Base series and regression fit



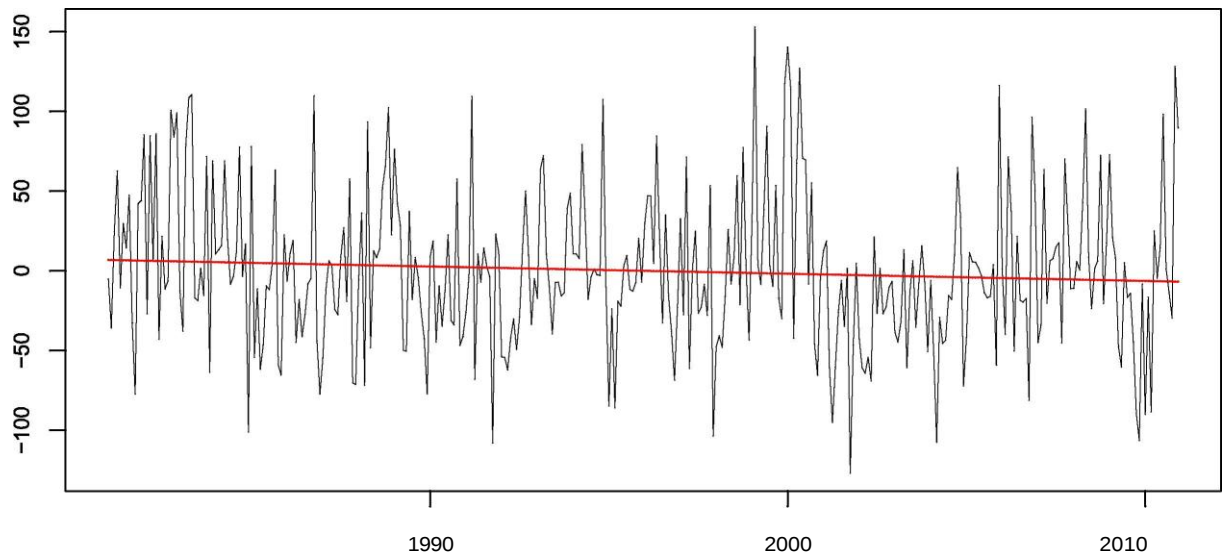
Base anomaly series and regression fit



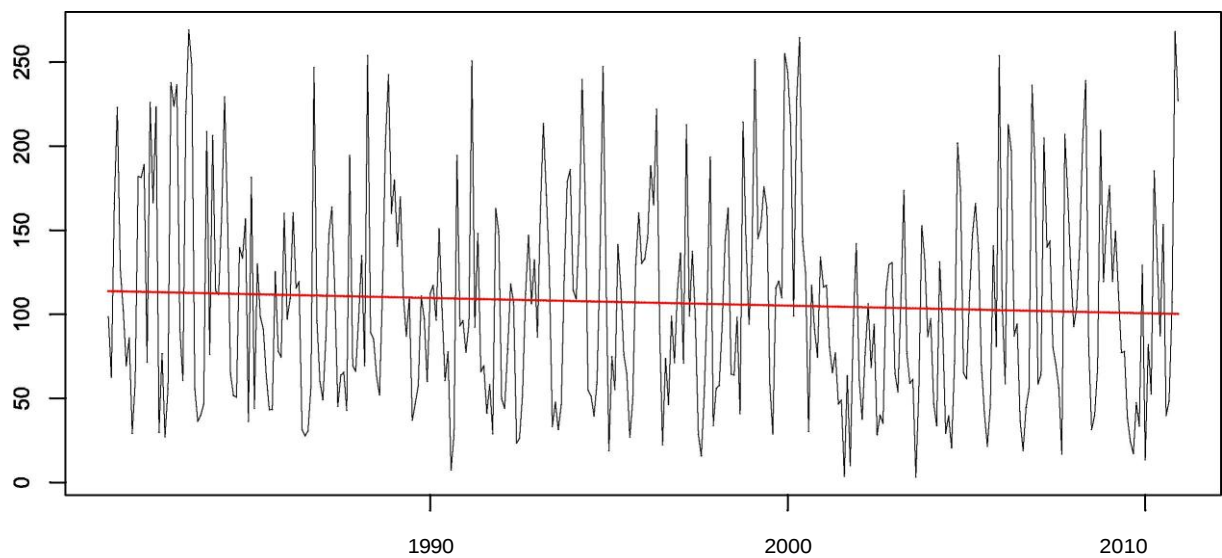
Base series and regression fit



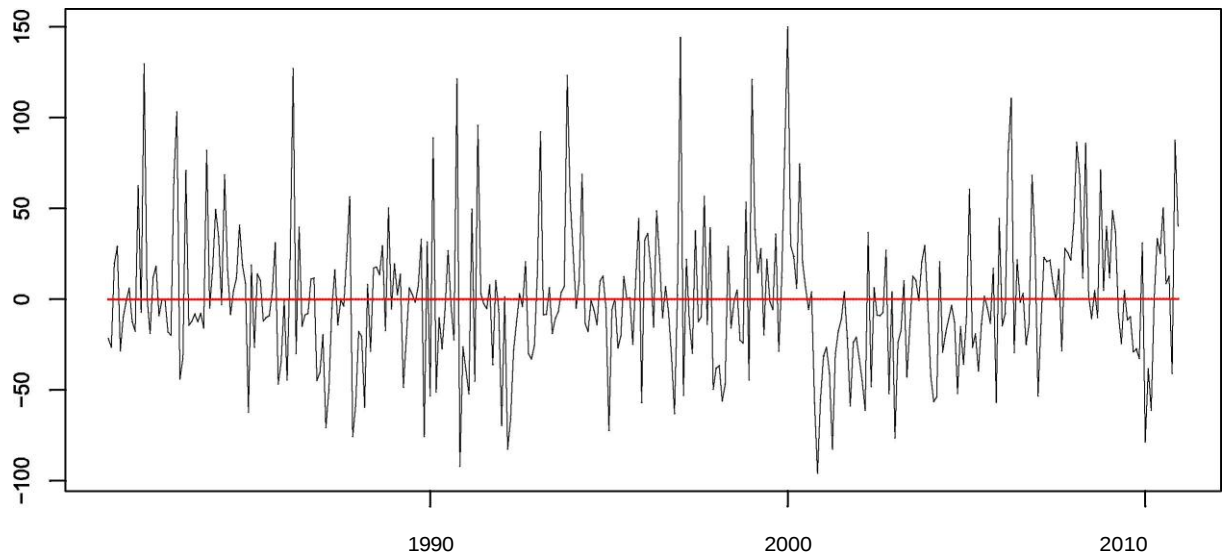
Base anomaly series and regression fit



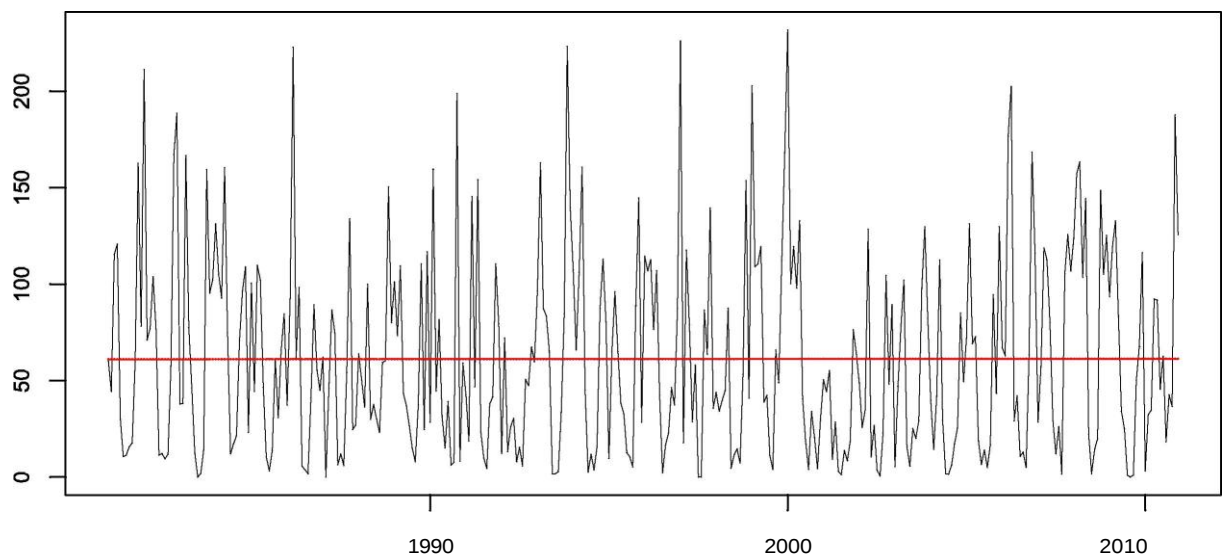
Base series and regression fit



Base anomaly series and regression fit

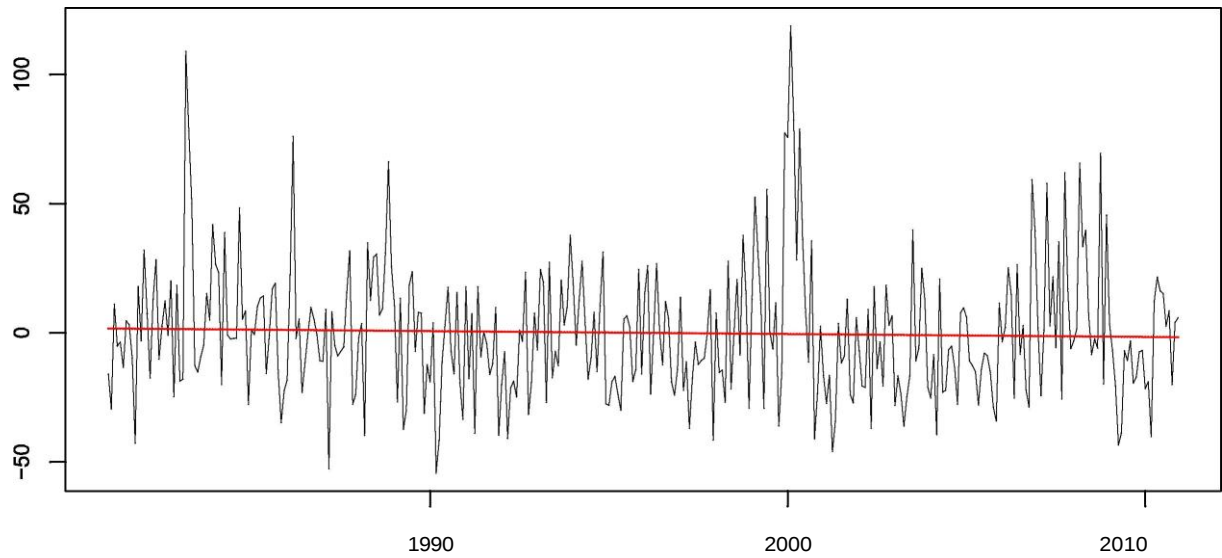


Base series and regression fit

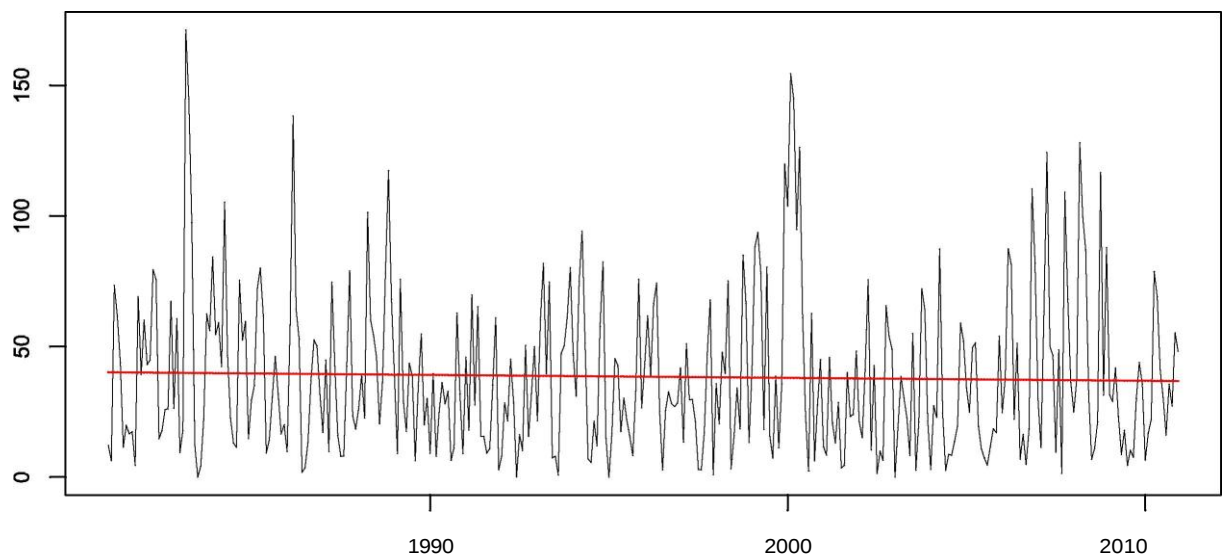


M0314 AMBUQUI

Base anomaly series and regression fit

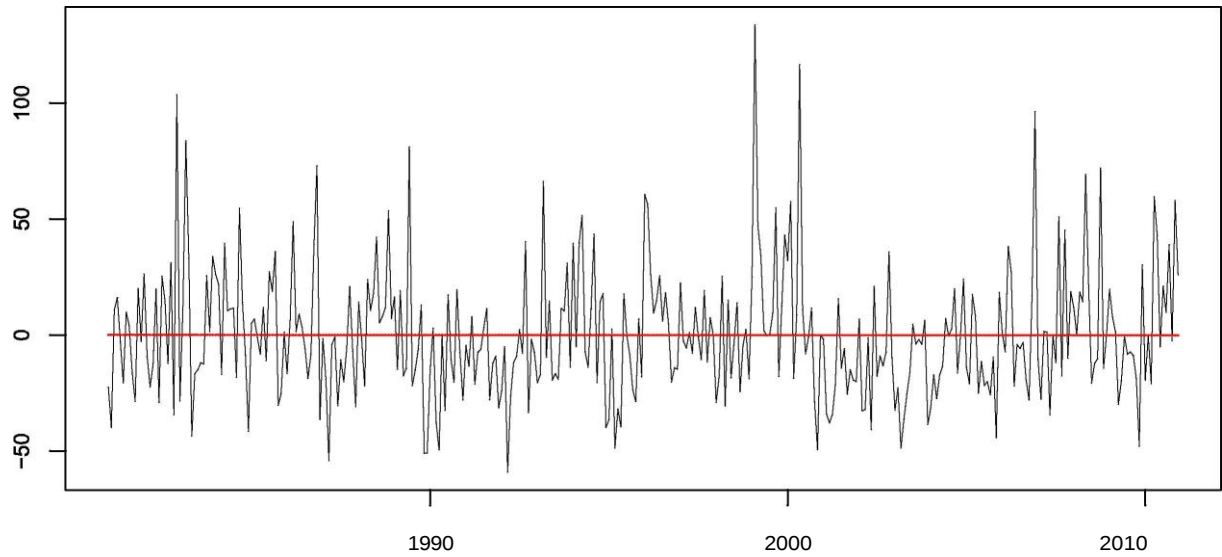


Base series and regression fit

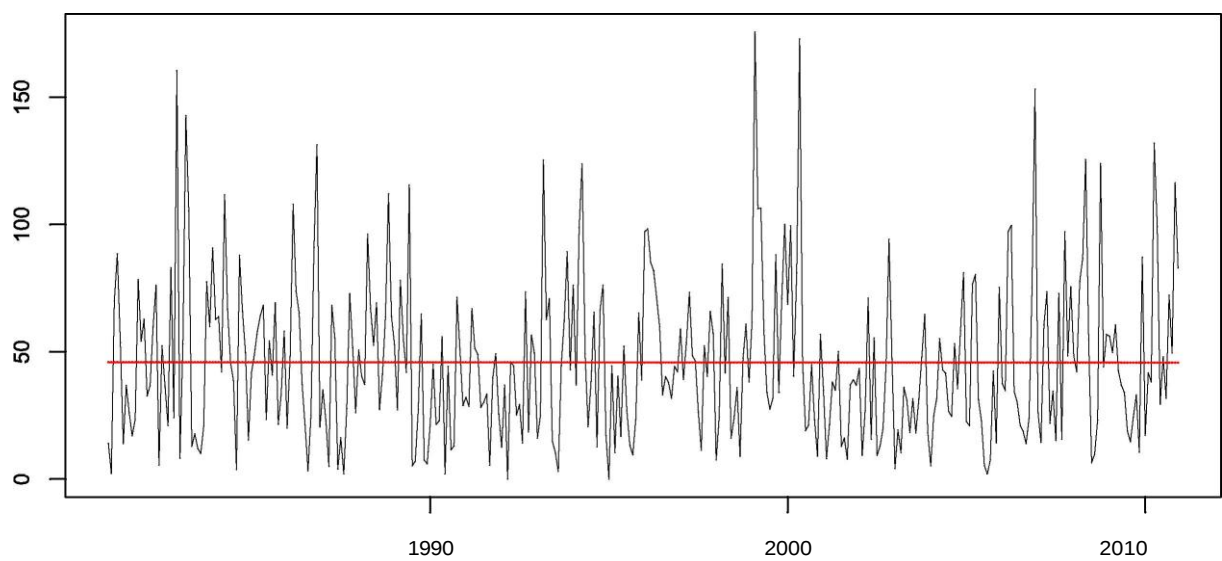


M0315 PIMAMPIRO

Base anomaly series and regression fit

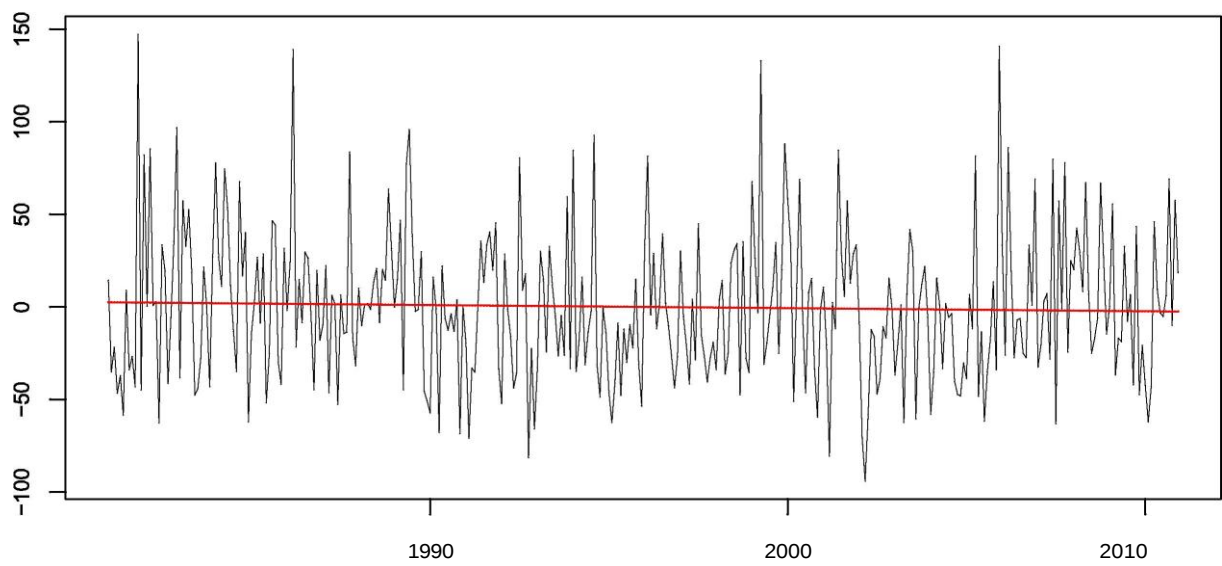


Base series and regression fit

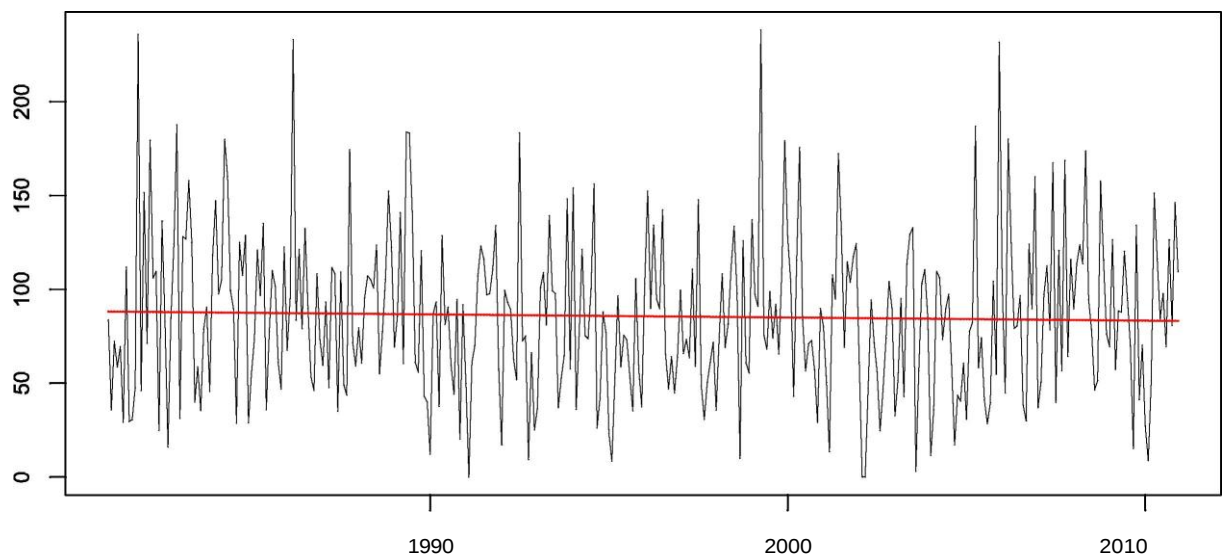


M0324 SAN FRANCISCO DE SIGSIPAMBA

Base anomaly series and regression fit

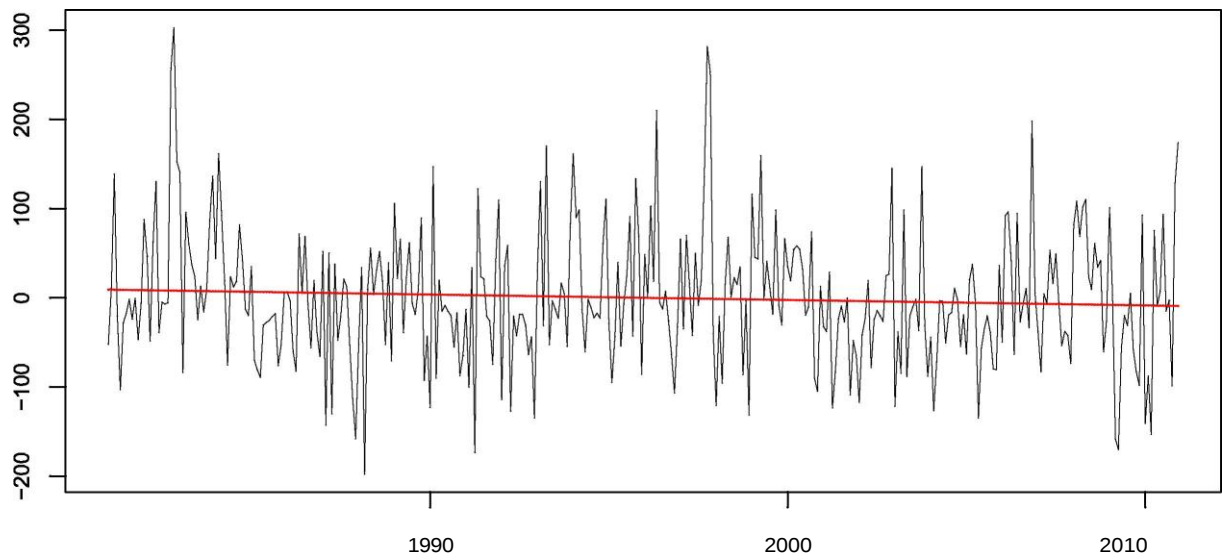


Base series and regression fit

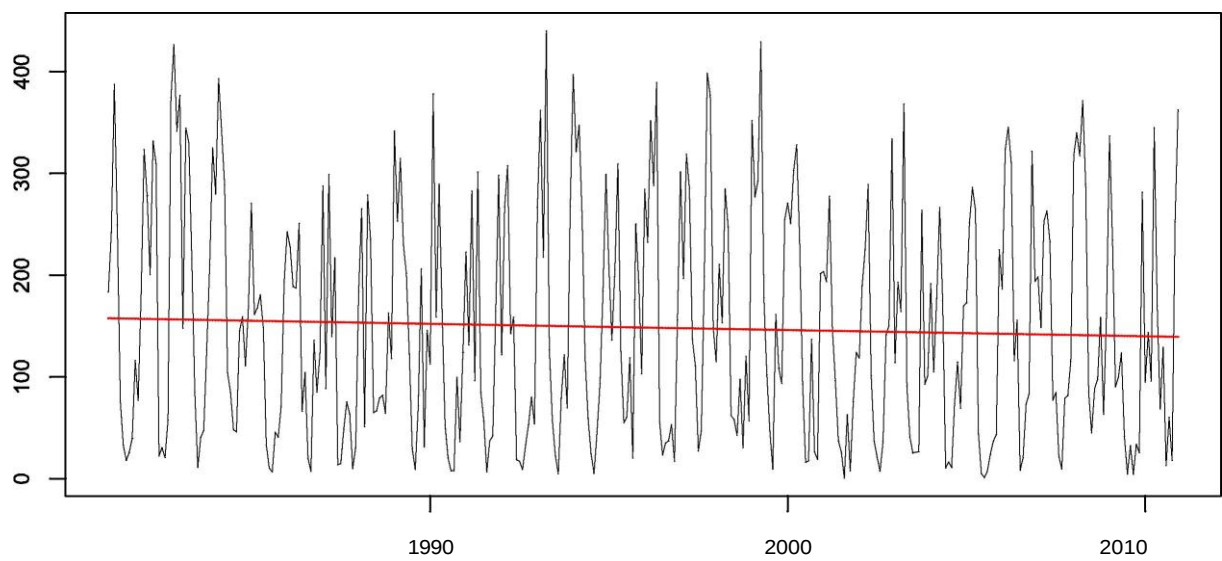


M0325 GARCIA MORENO

Base anomaly series and regression fit

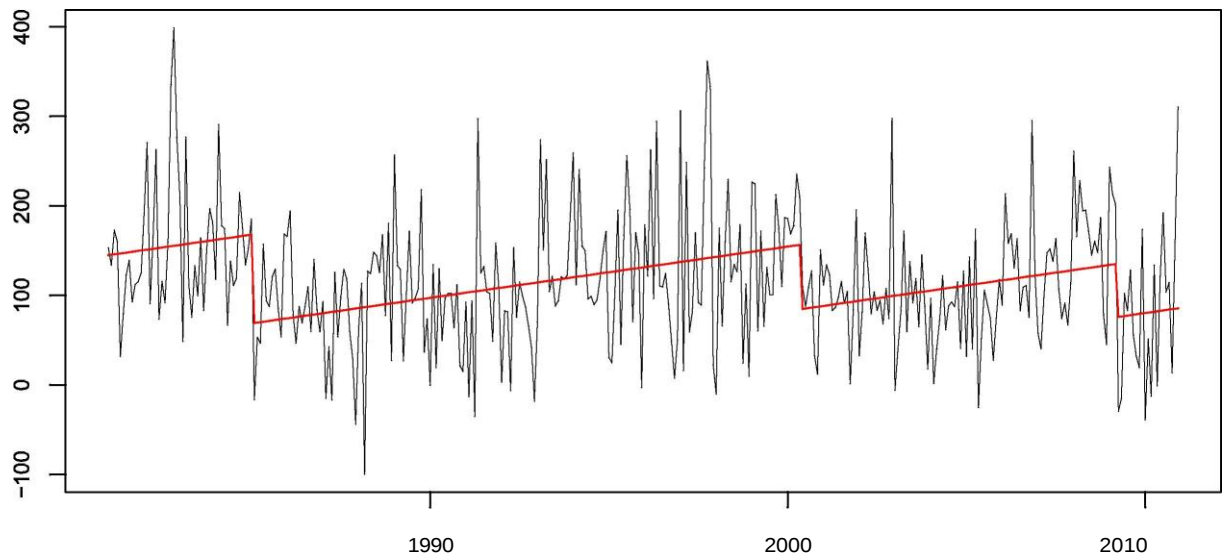


Base series and regression fit

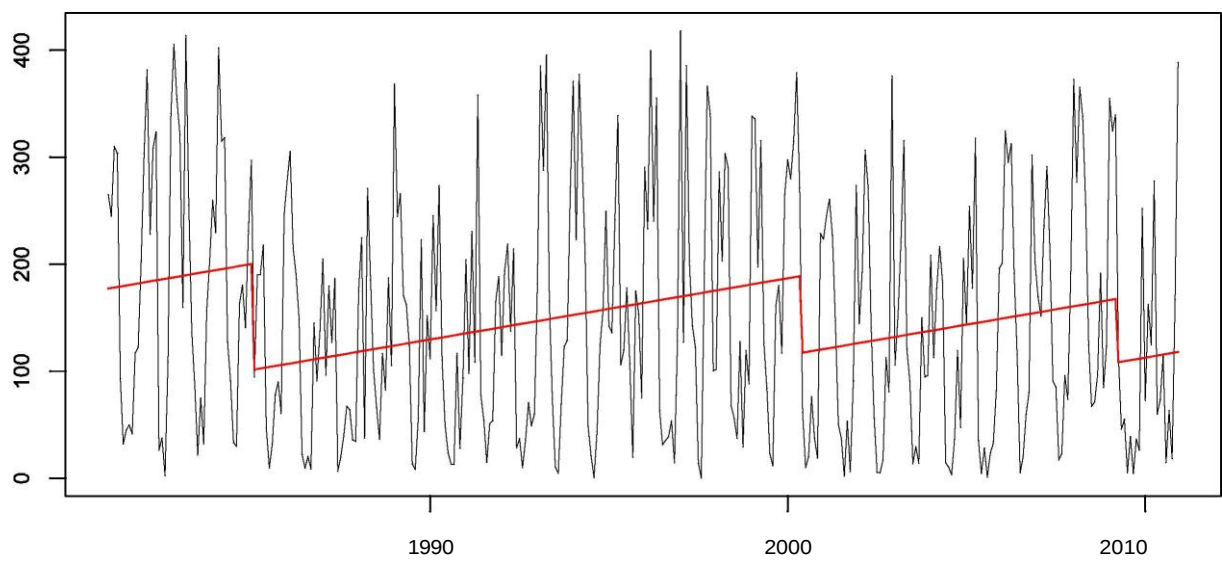


M0326 SELVA ALEGRE-IMBABURA

Base anomaly series and regression fit

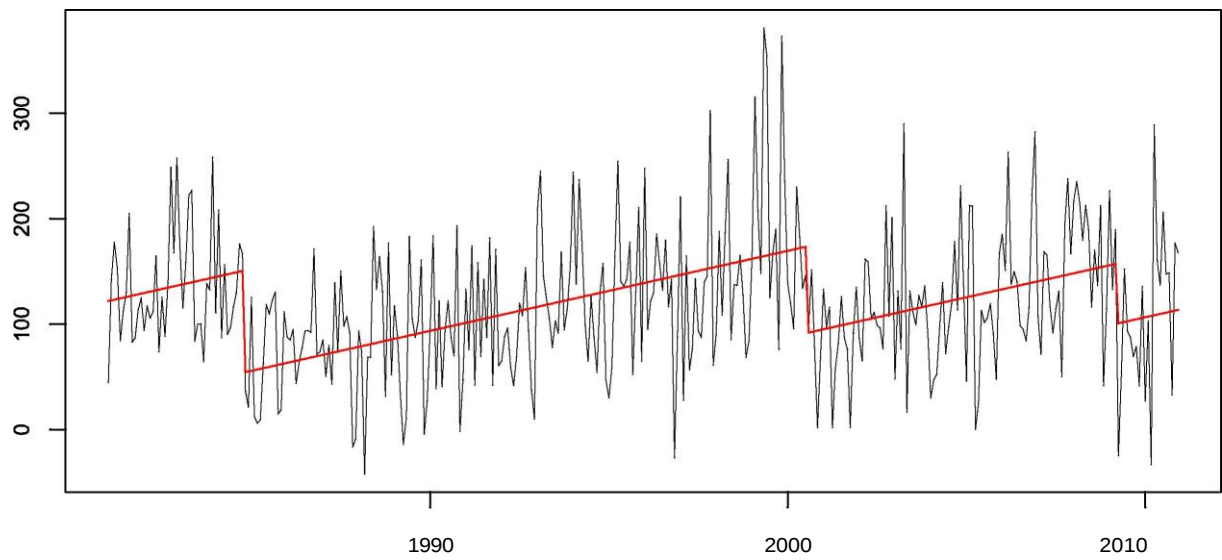


Base series and regression fit

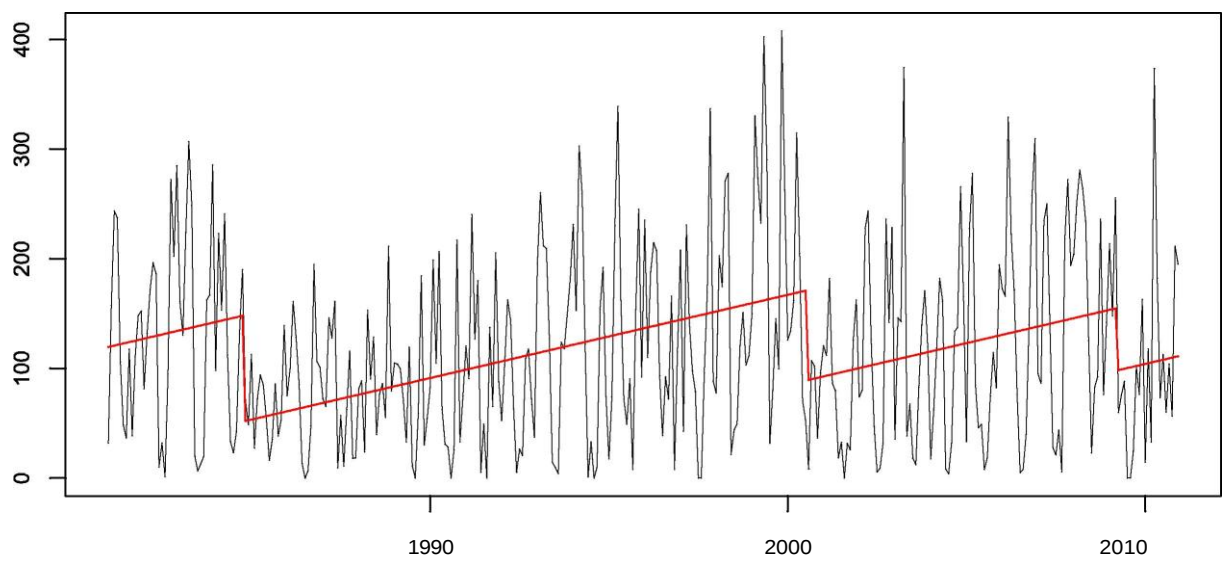


M0335 LA CHORRERA

Base anomaly series and regression fit

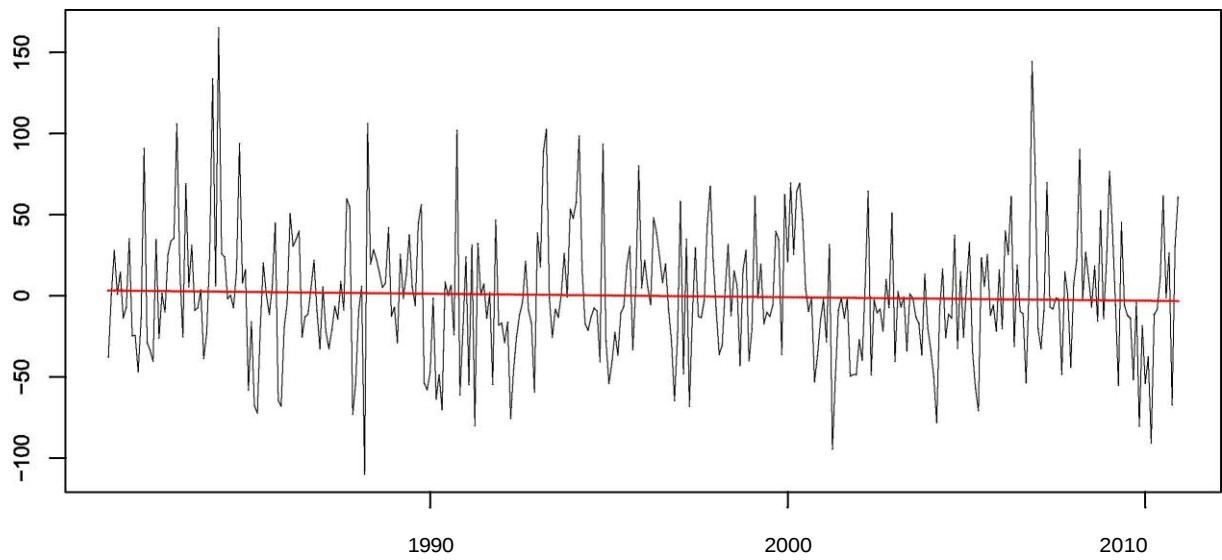


Base series and regression fit

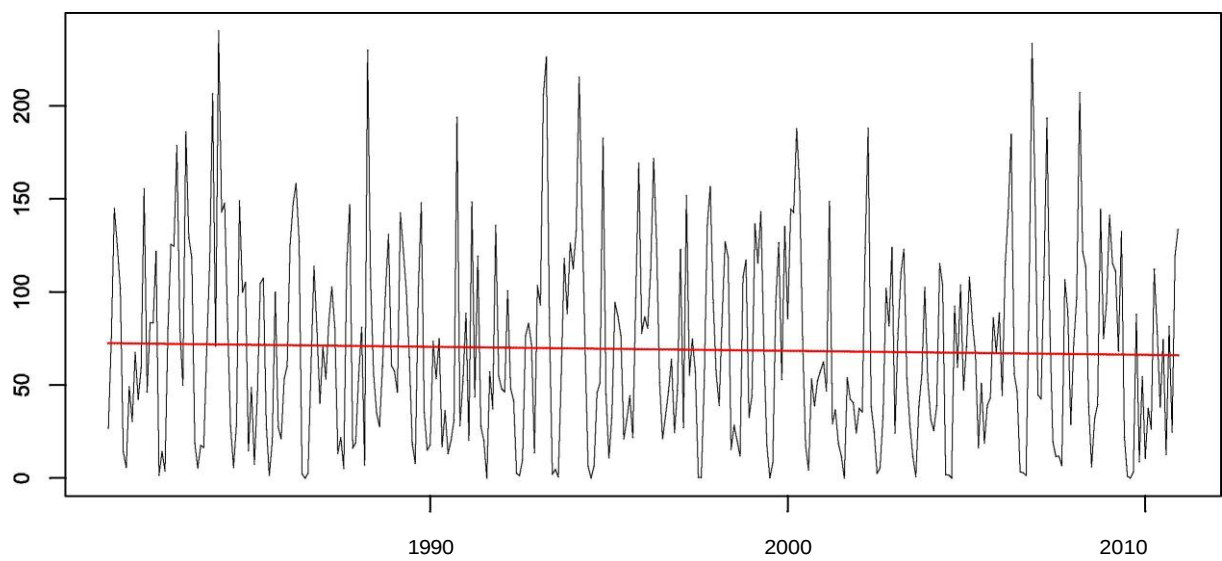


M0346 YARUQUI INAMHI

Base anomaly series and regression fit

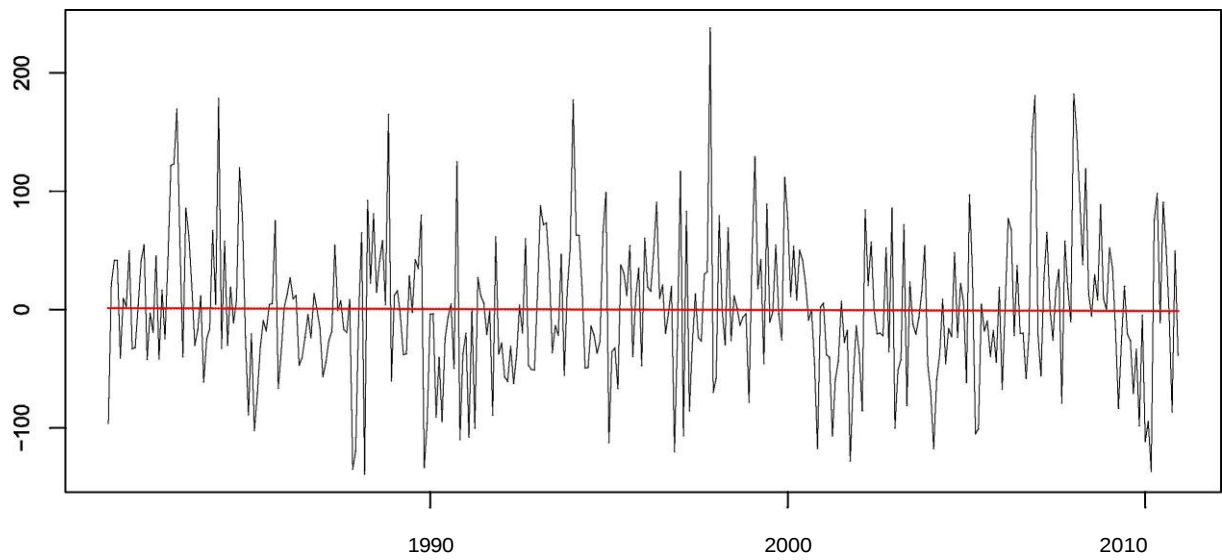


Base series and regression fit

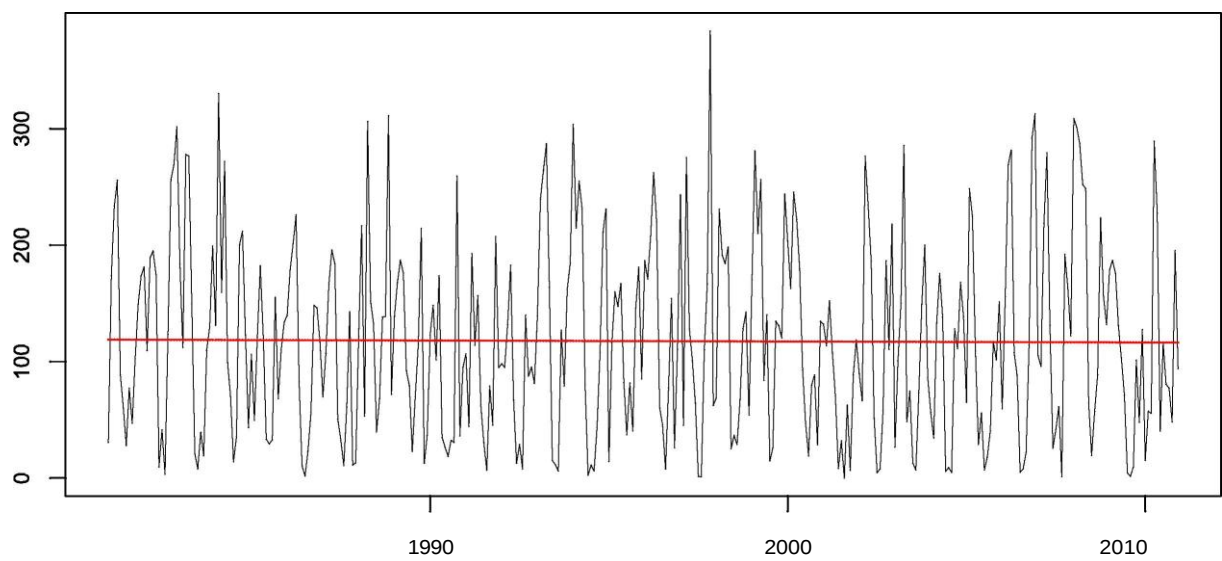


M0357 CANAL 10 TV-QUITO

Base anomaly series and regression fit

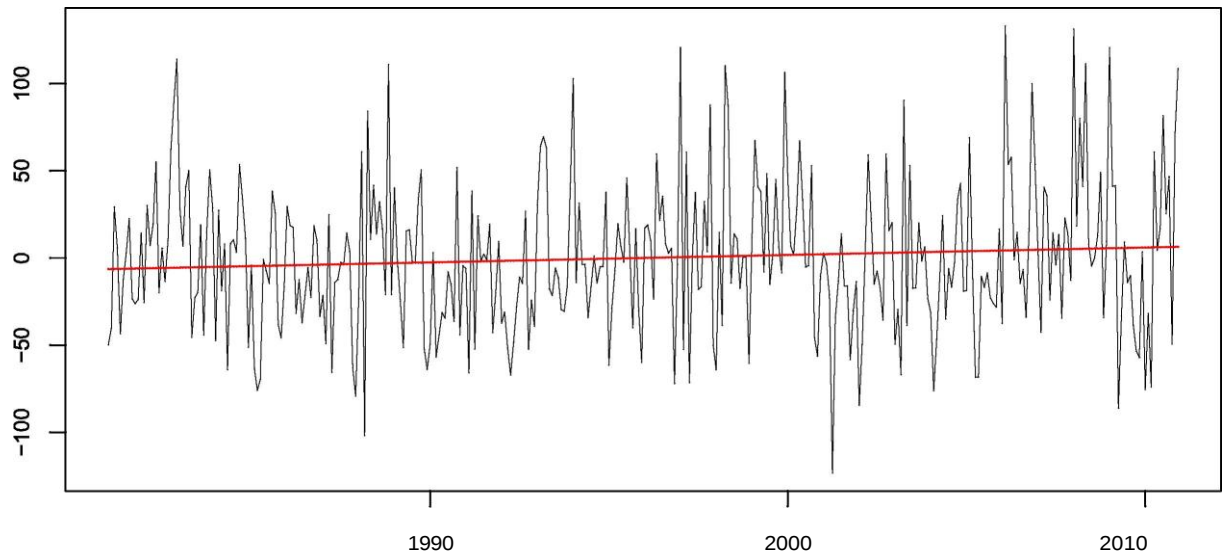


Base series and regression fit

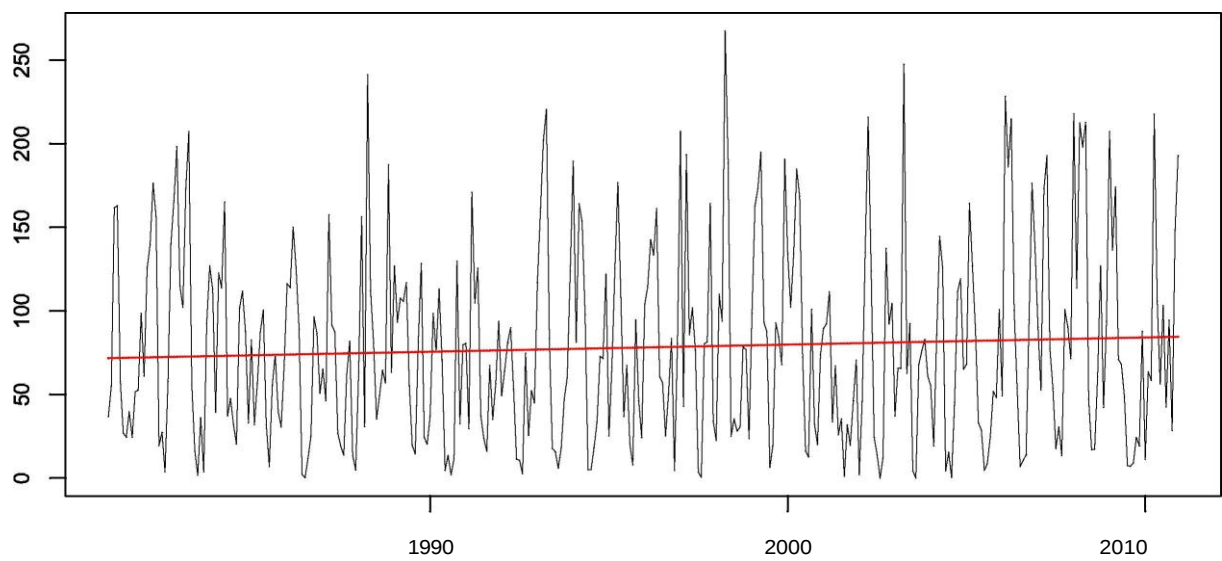


M0361 NONO QUITO

Base anomaly series and regression fit

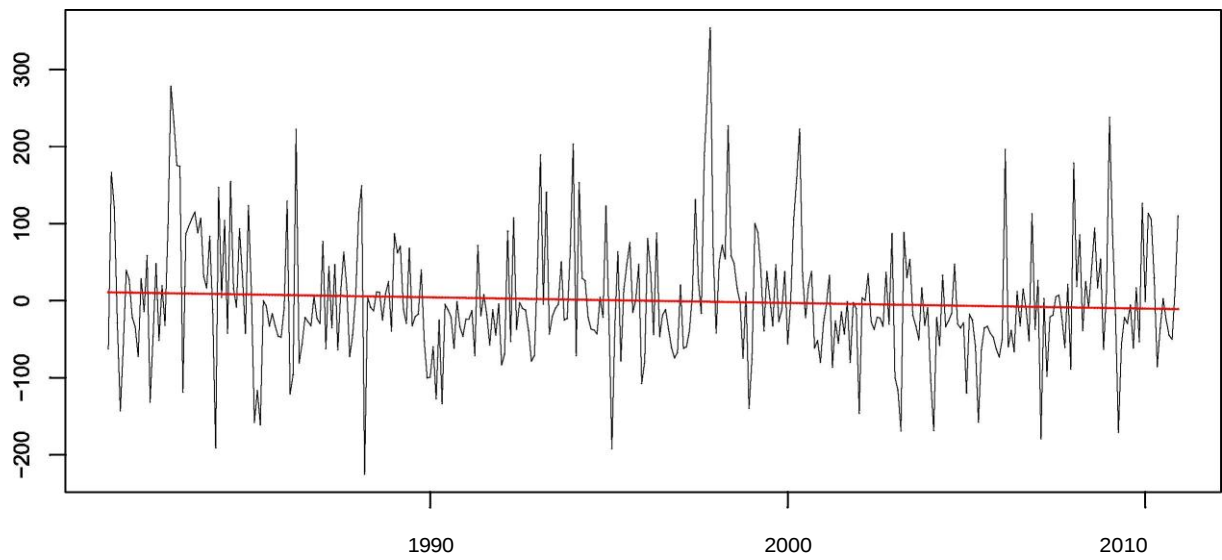


Base series and regression fit

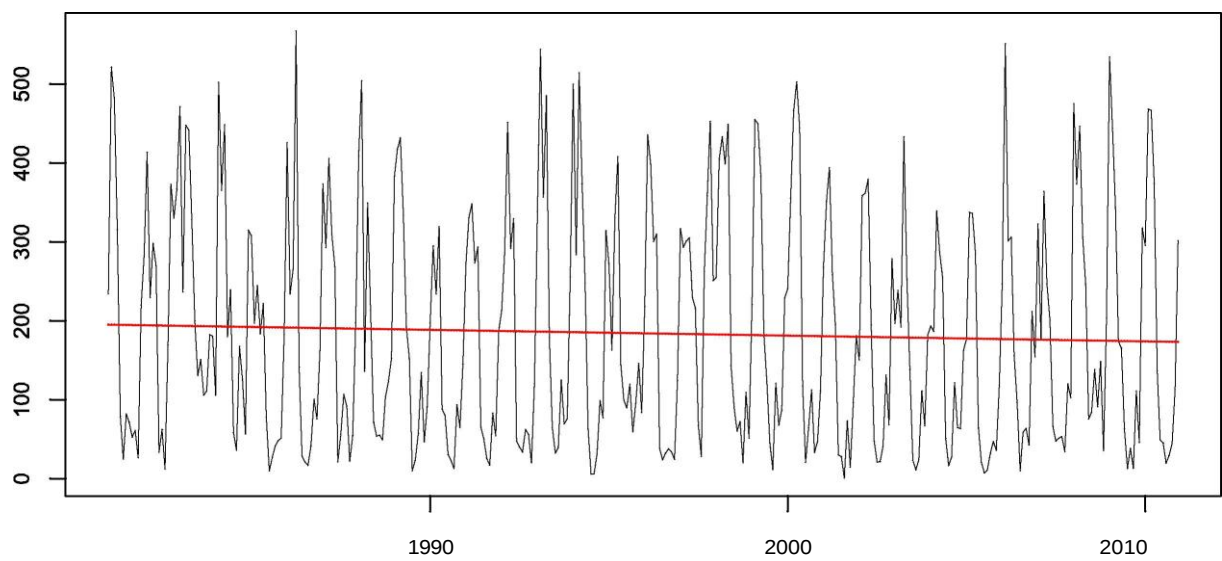


M0362 LAS PAMPAS

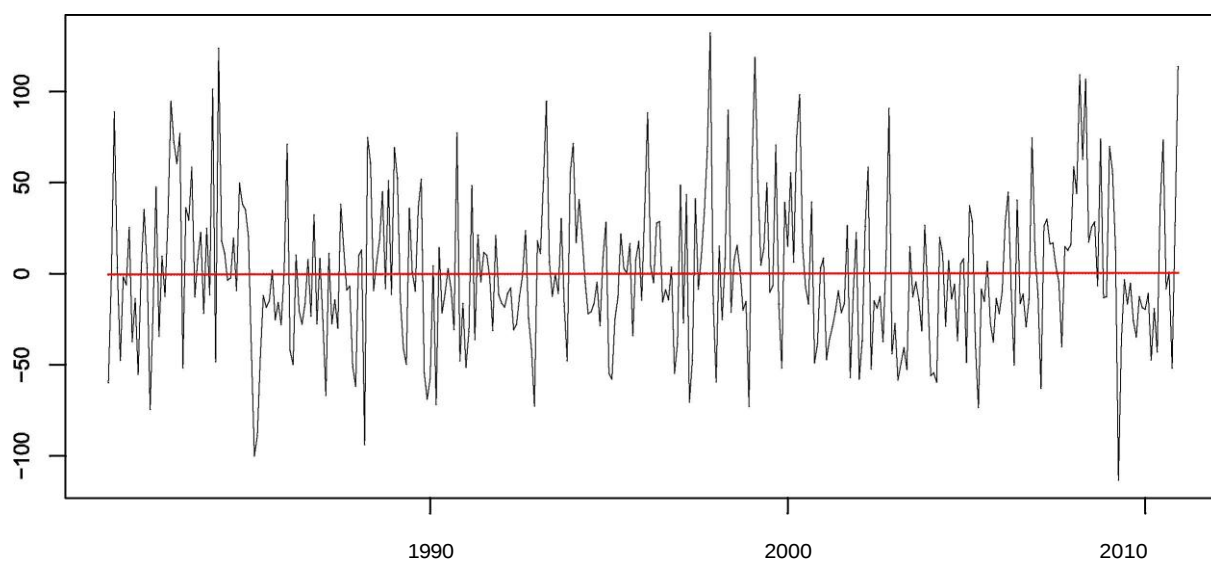
Base anomaly series and regression fit



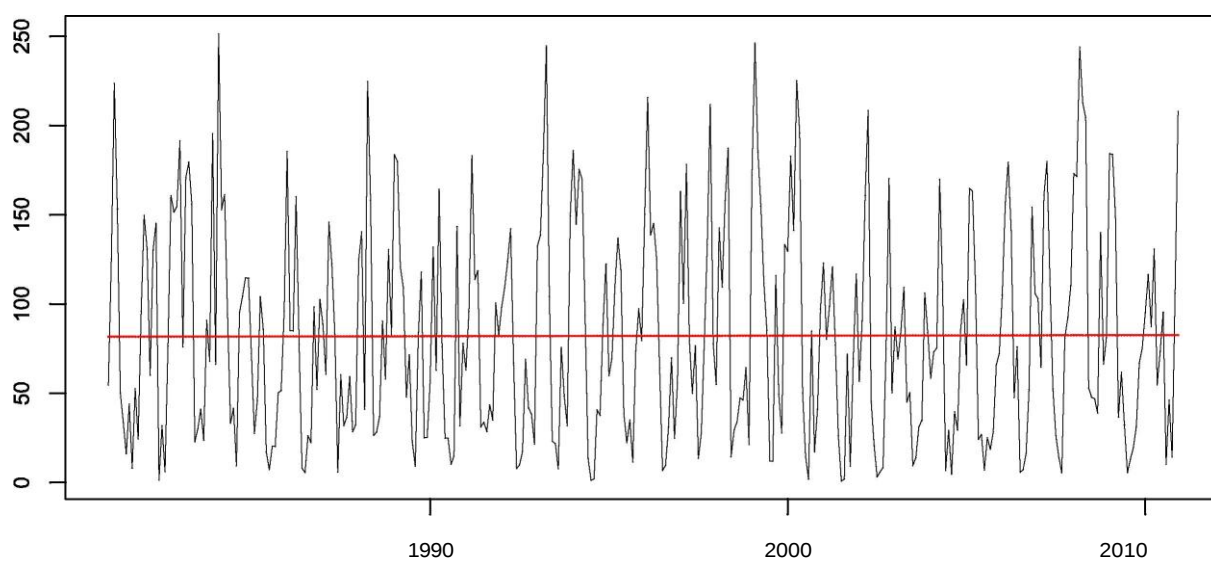
Base series and regression fit



Base anomaly series and regression fit

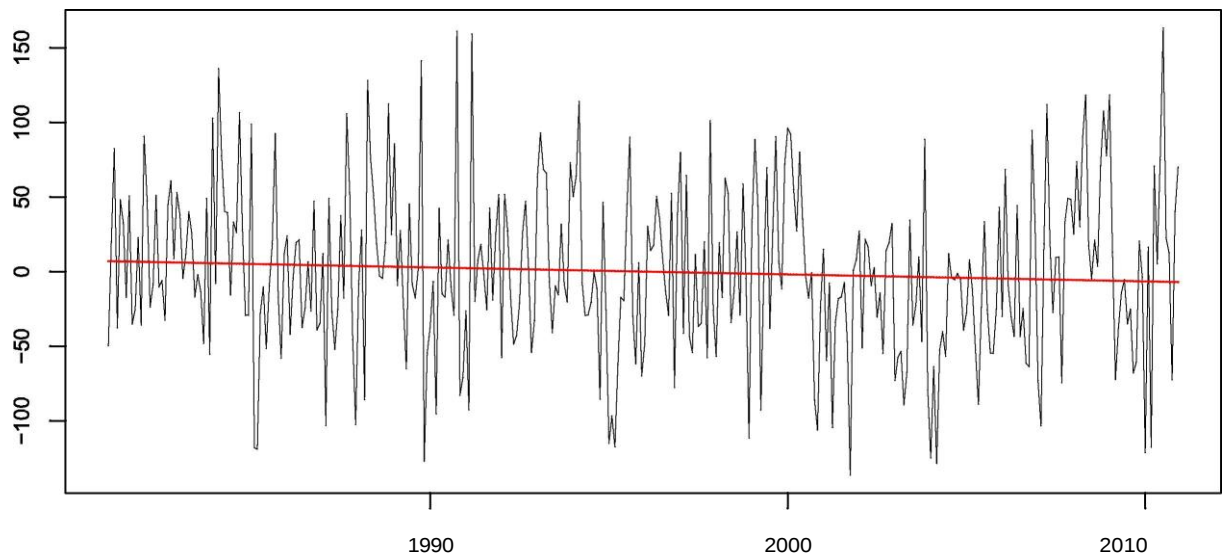


Base series and regression fit

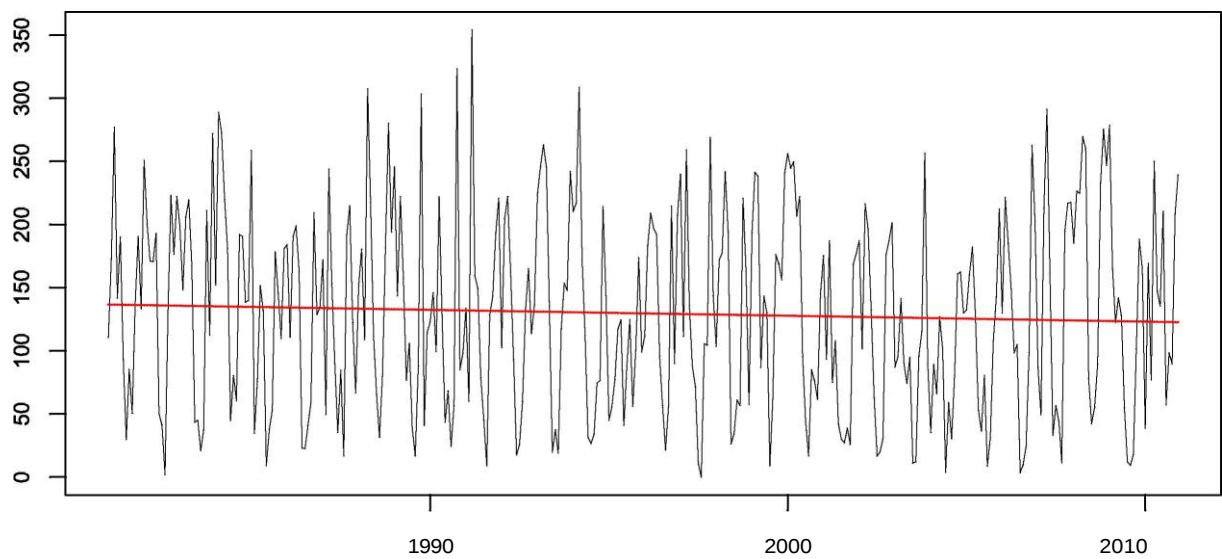


M0364 LORETO PEDREGAL QUITO

Base anomaly series and regression fit



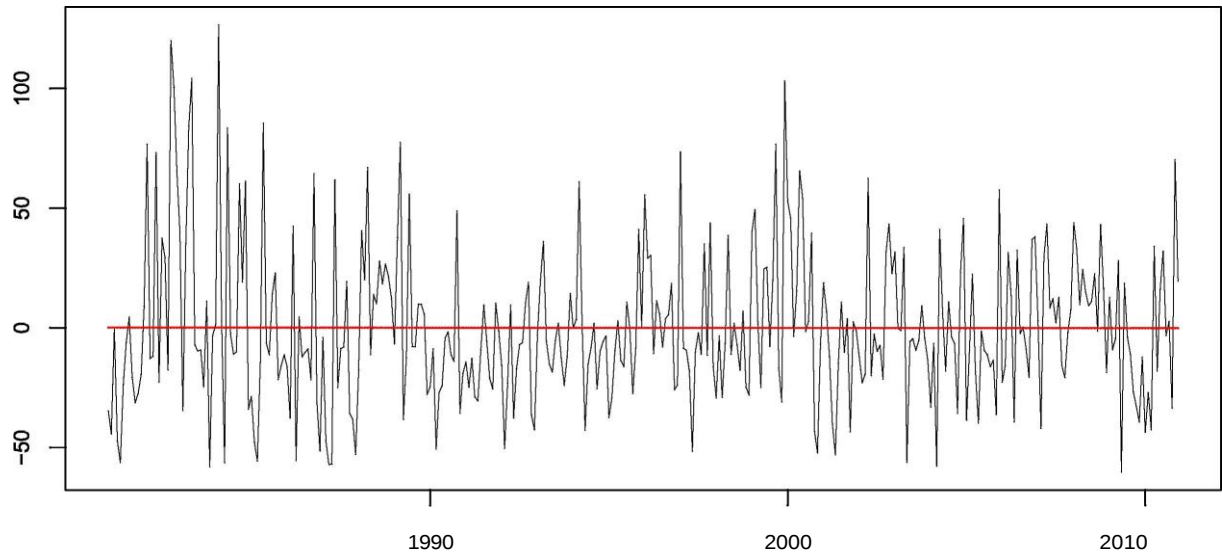
Base series and regression fit



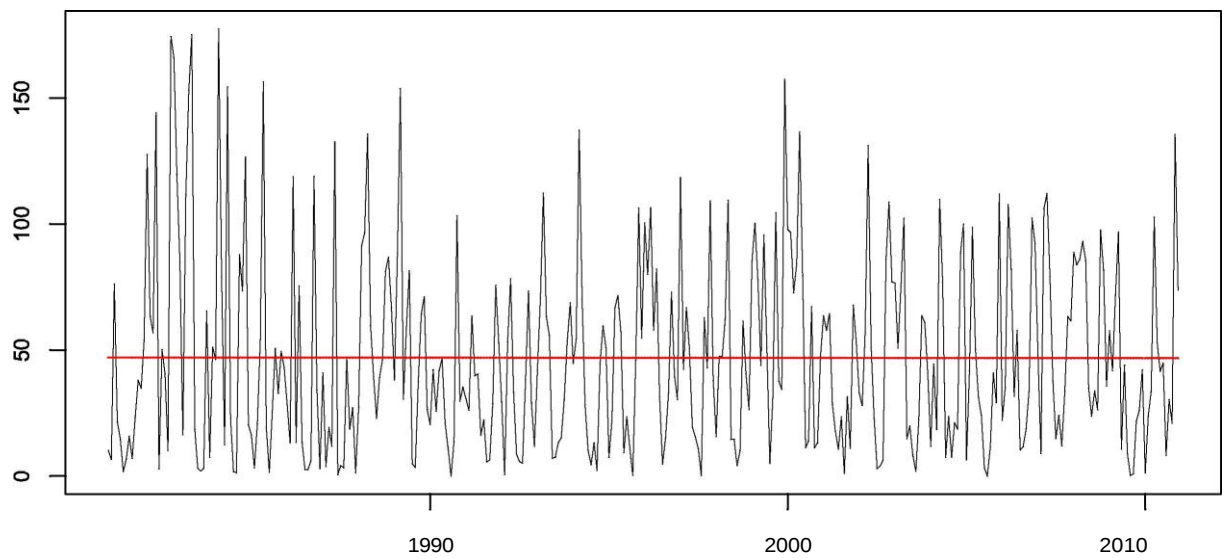
Mean-adjusted base series

M0369 CUSUBAMBA

Base anomaly series and regression fit



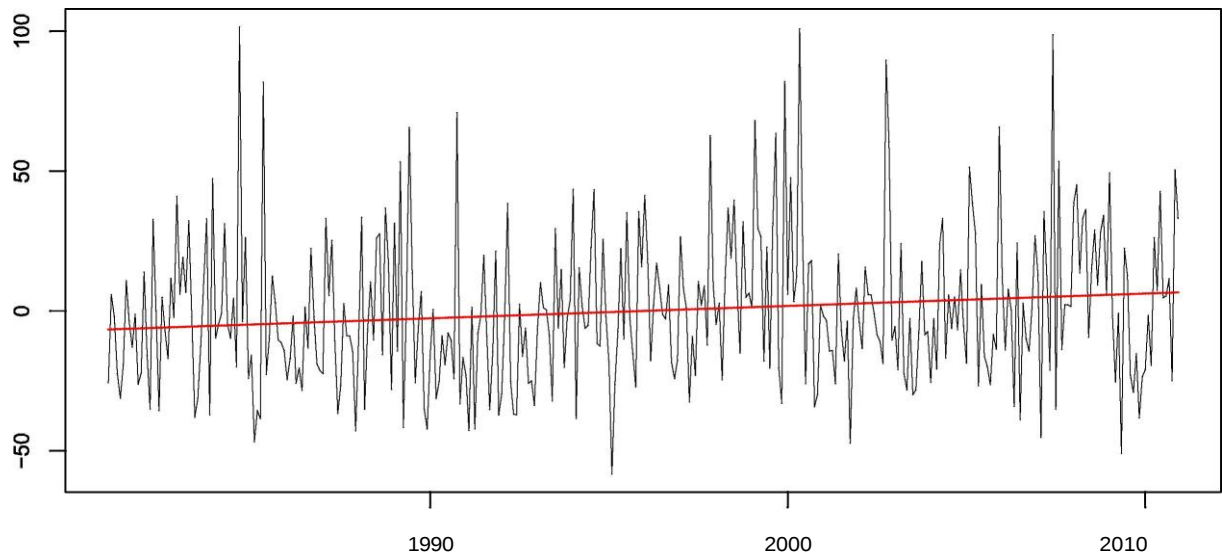
Base series and regression fit



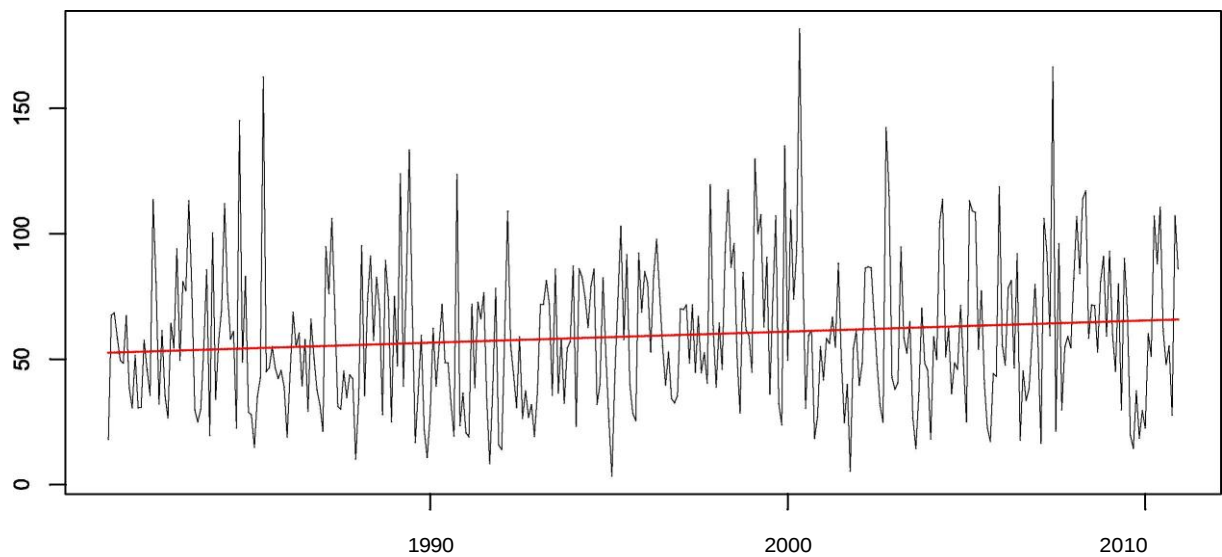
Mean-adjusted base series

M0376 PILAHUIN

Base anomaly series and regression fit



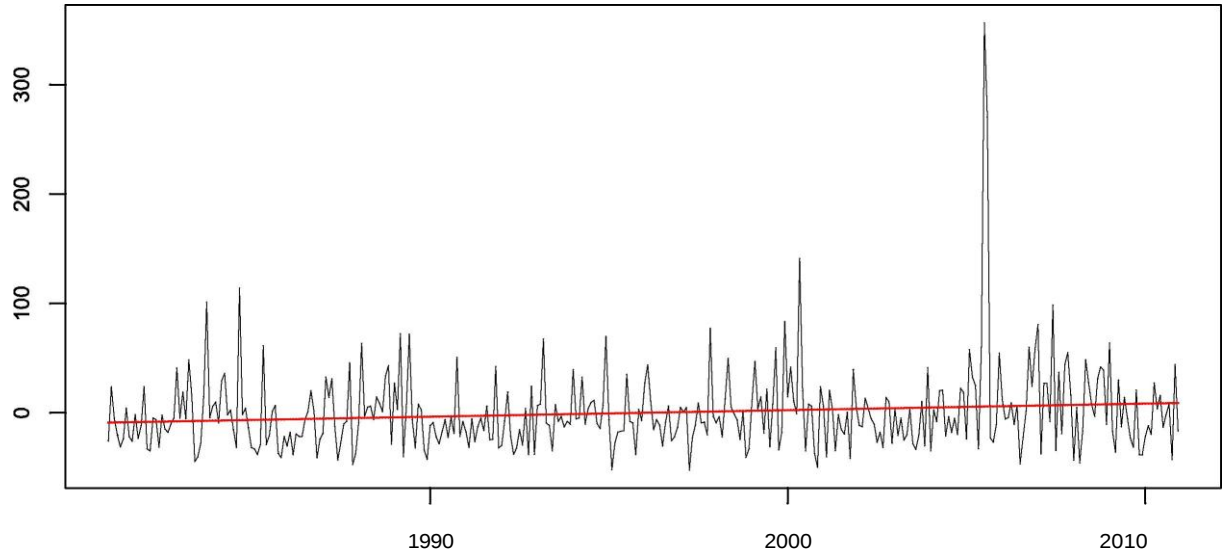
Base series and regression fit



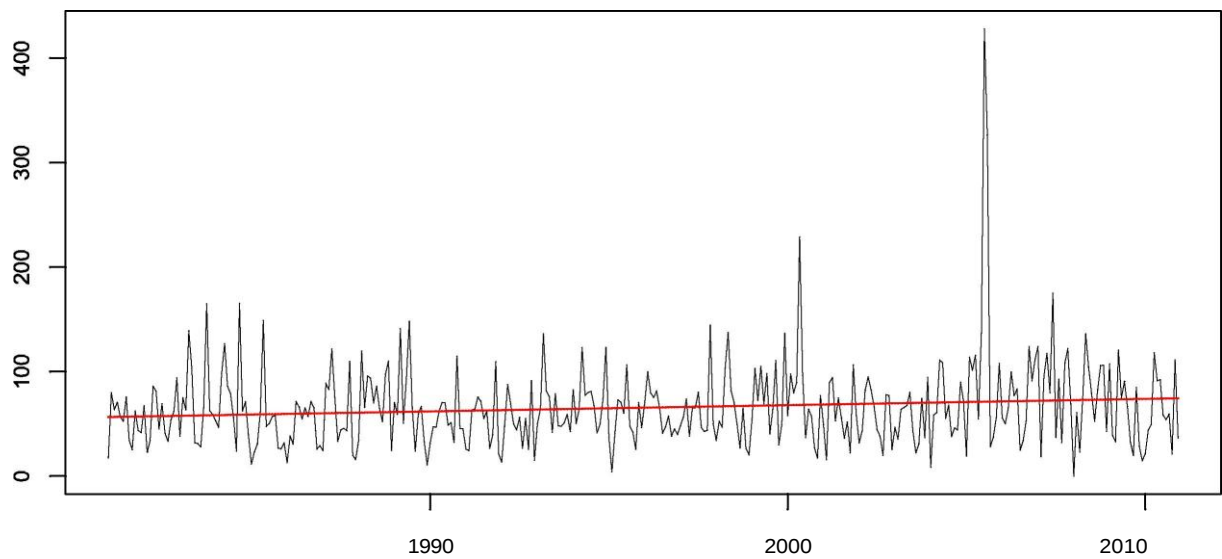
Mean-adjusted base series

M0377 TISALEO

Base anomaly series and regression fit



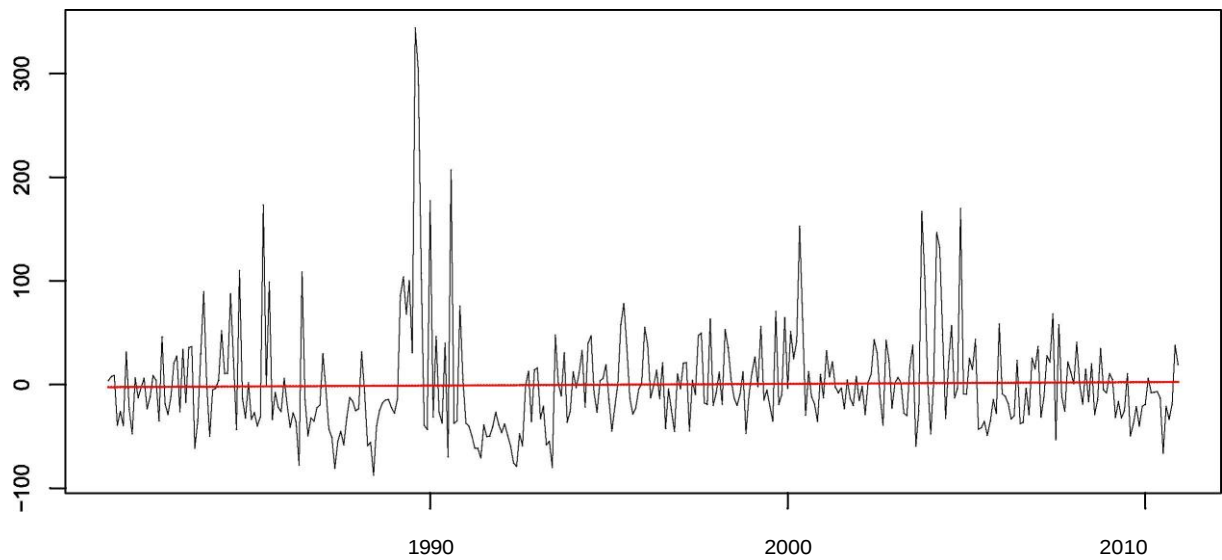
Base series and regression fit



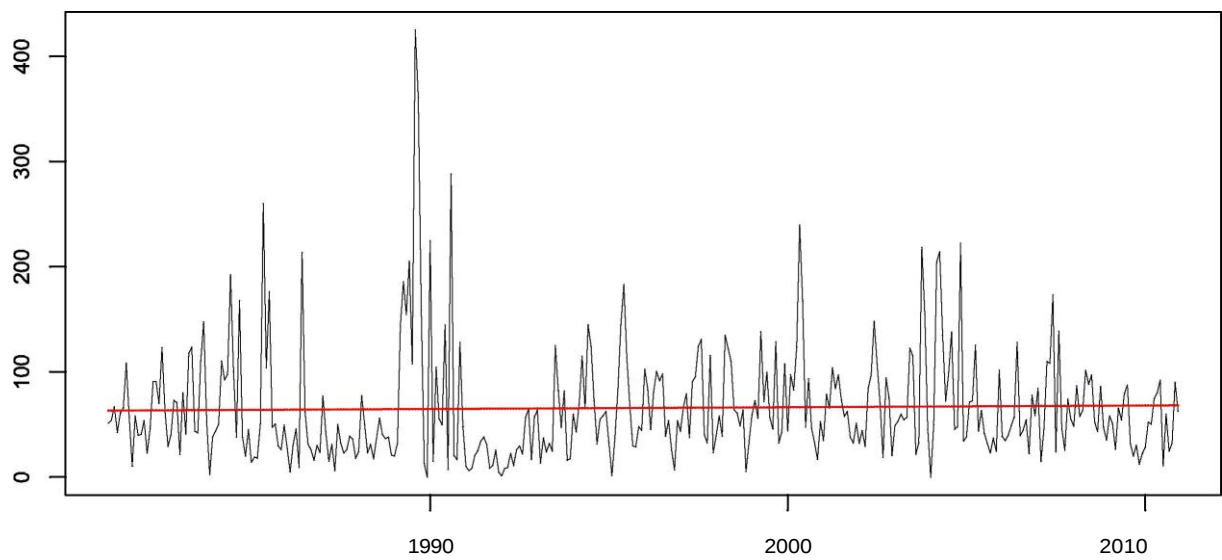
Mean-adjusted base series

M0380 HUAMBALO

Base anomaly series and regression fit



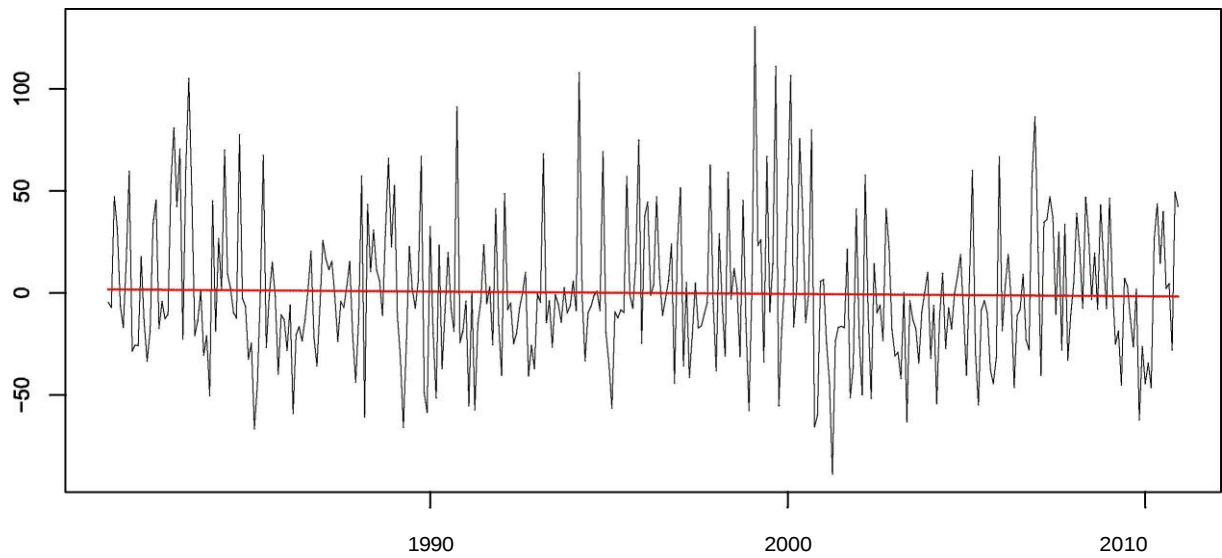
Base series and regression fit



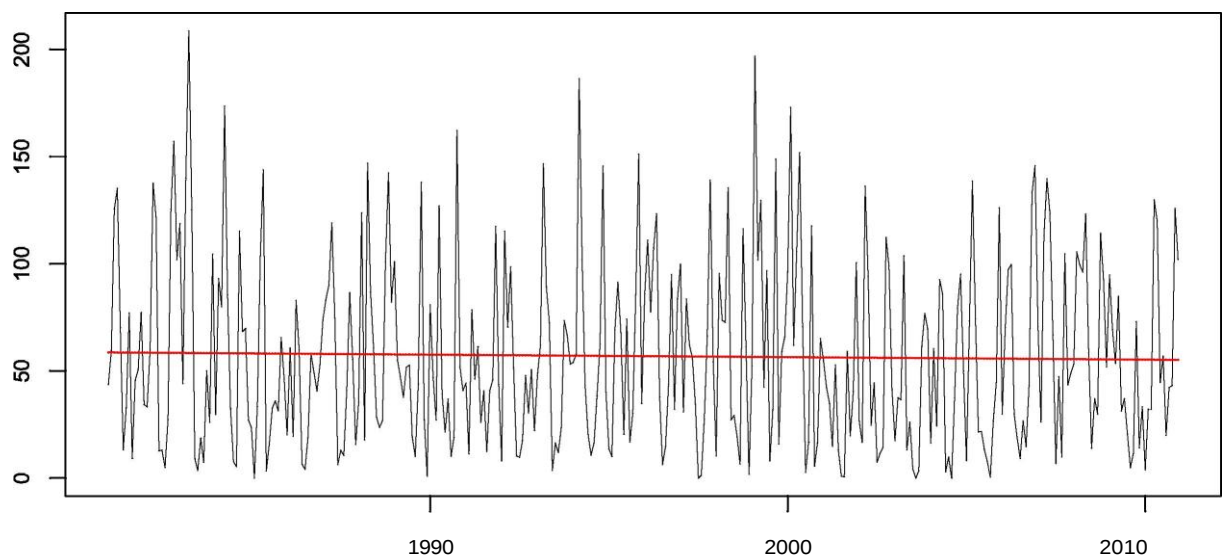
Mean-adjusted base series

M0393 SAN JUAN-CHIMBORAZO

Base anomaly series and regression fit



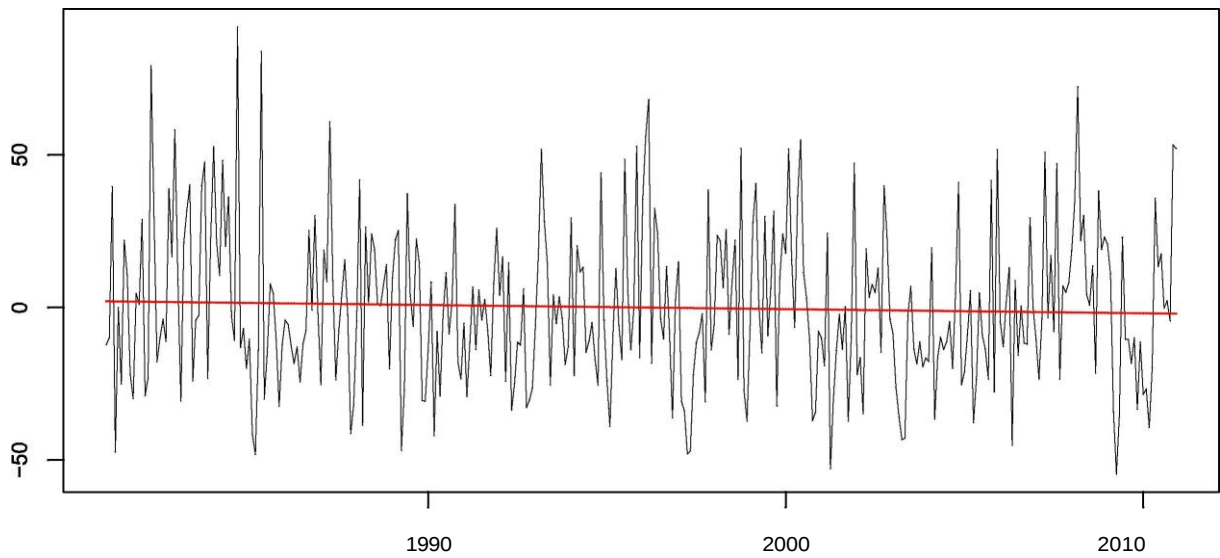
Base series and regression fit



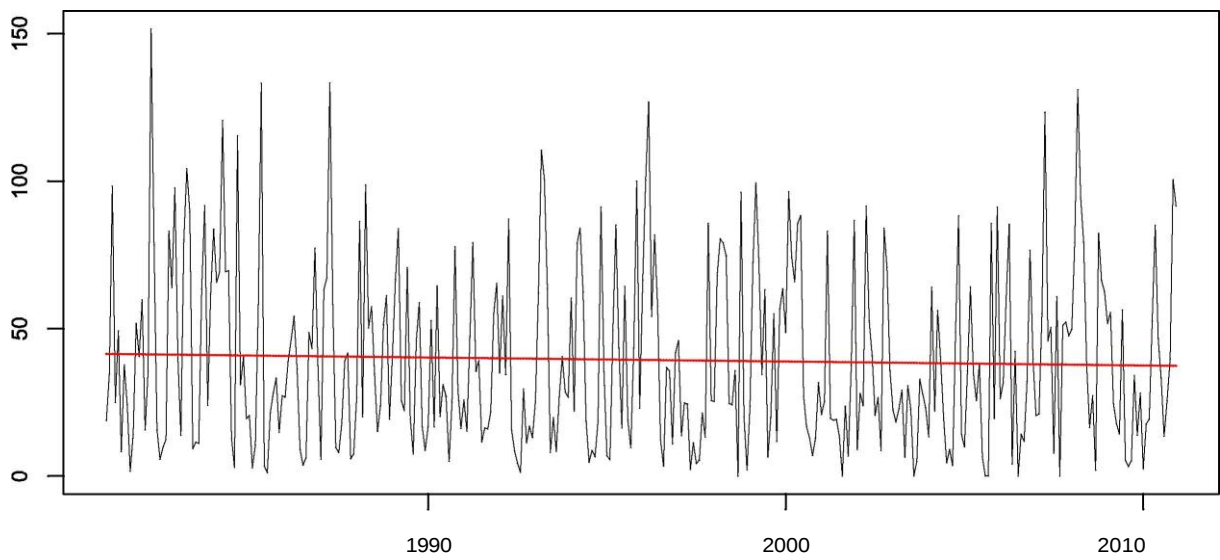
Mean-adjusted base series

M0408 GUANO

Base anomaly series and regression fit



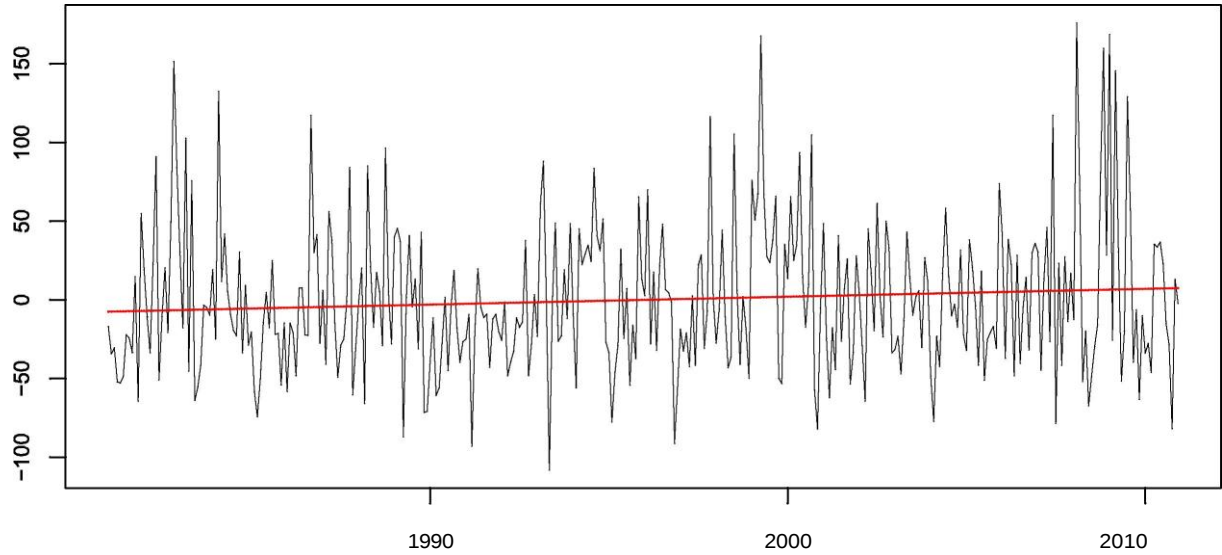
Base series and regression fit



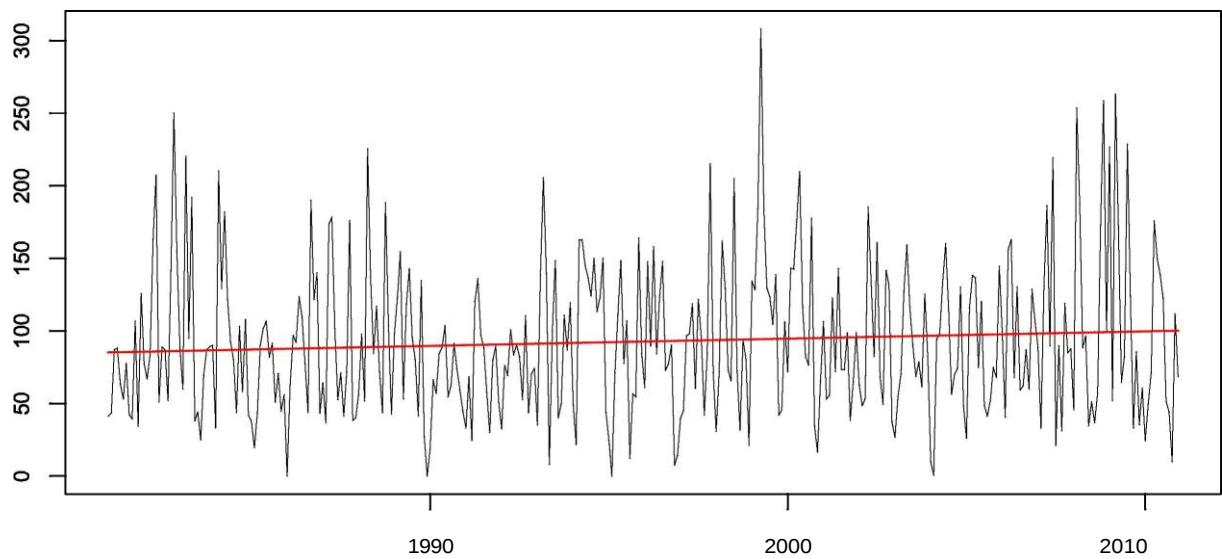
Mean-adjusted base series

M0414 CHANIN

Base anomaly series and regression fit



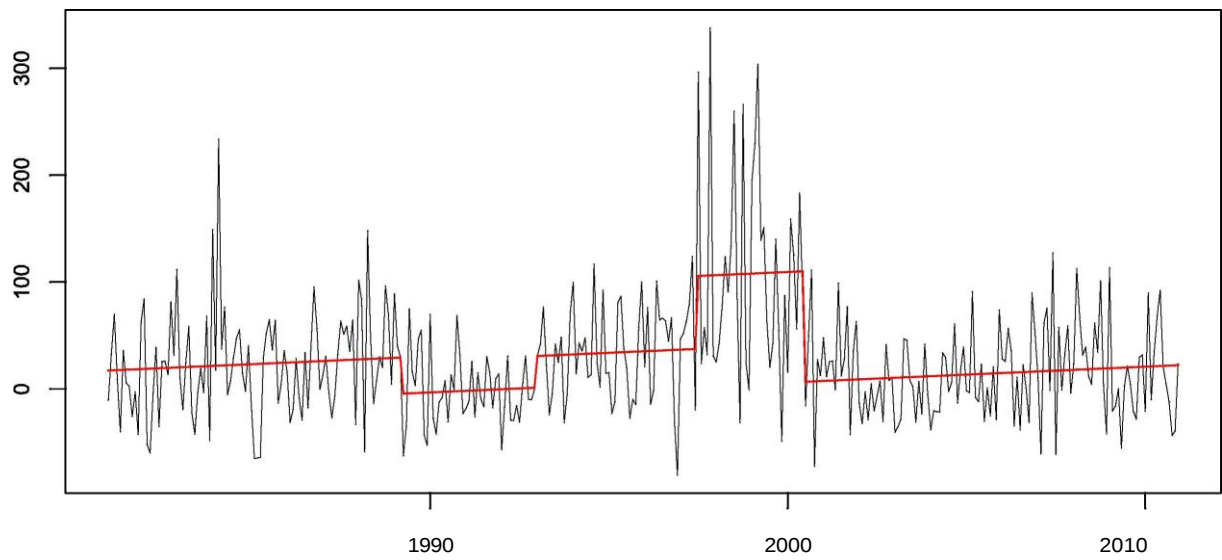
Base series and regression fit



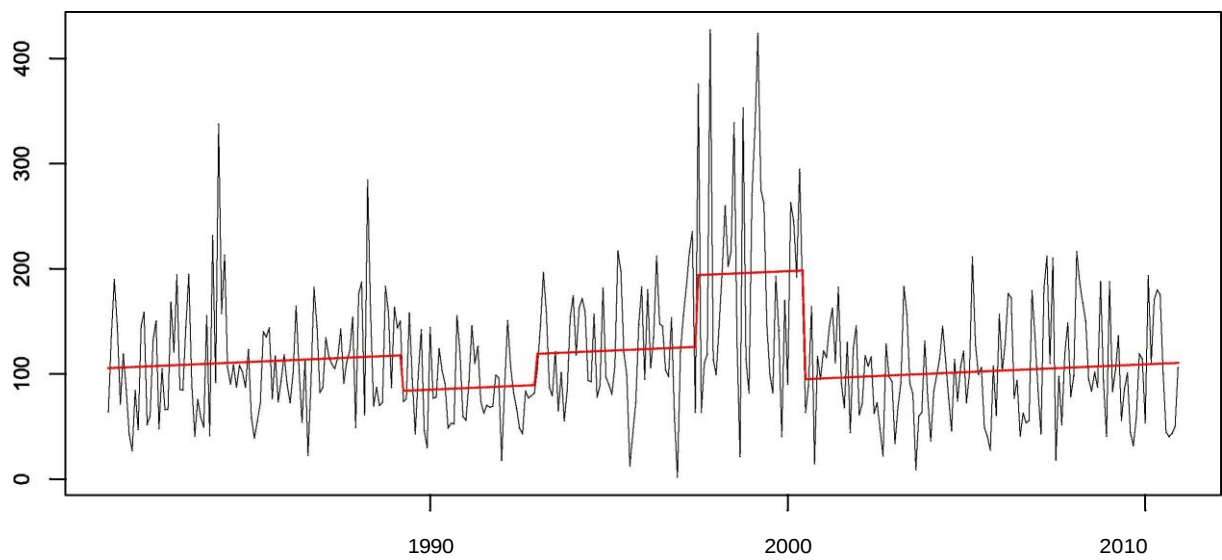
Mean-adjusted base series

M0417 PISCICOLA CHIRIMICHAY

Base anomaly series and regression fit



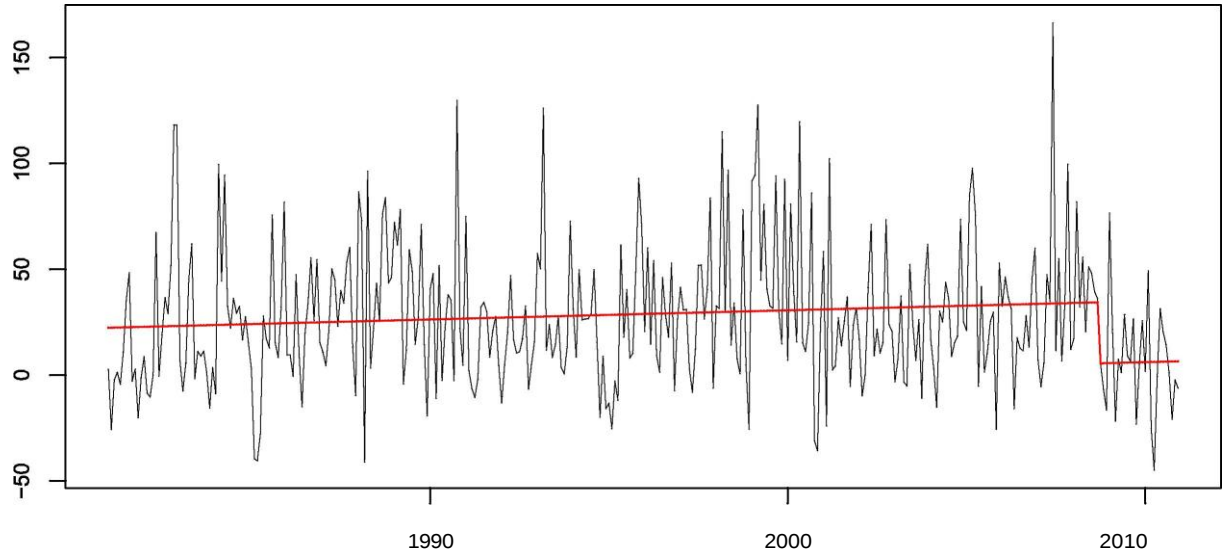
Base series and regression fit



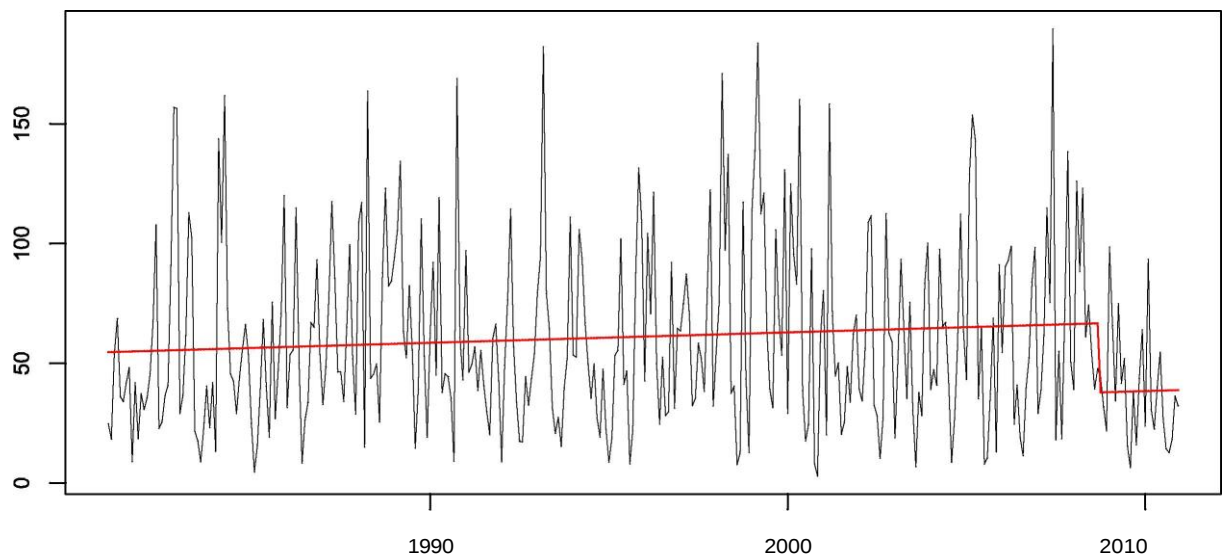
Mean-adjusted base series

M0418 CUMBE

Base anomaly series and regression fit



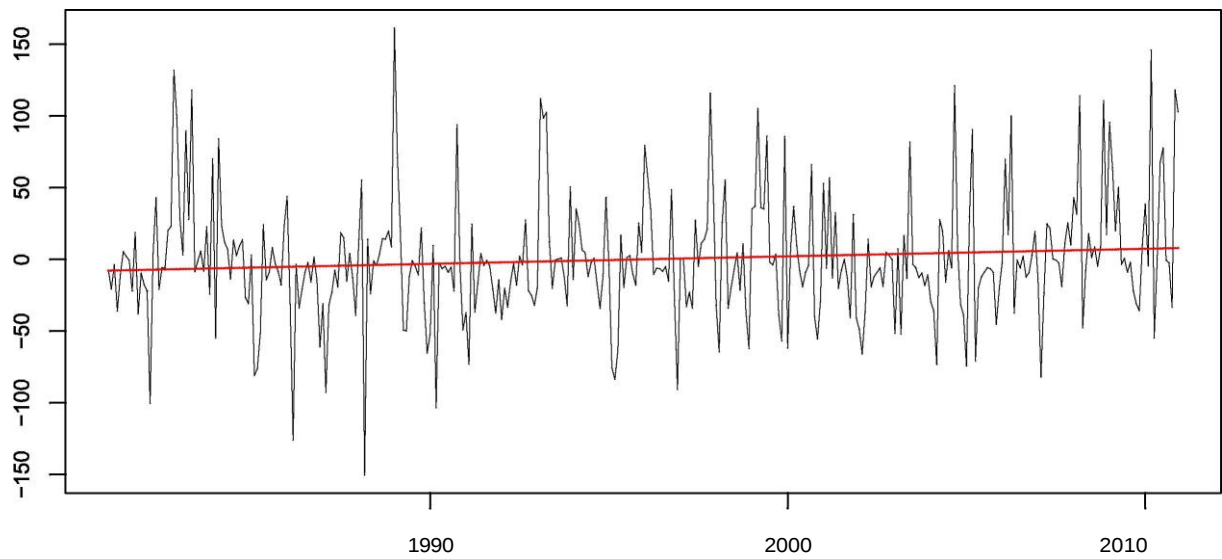
Base series and regression fit



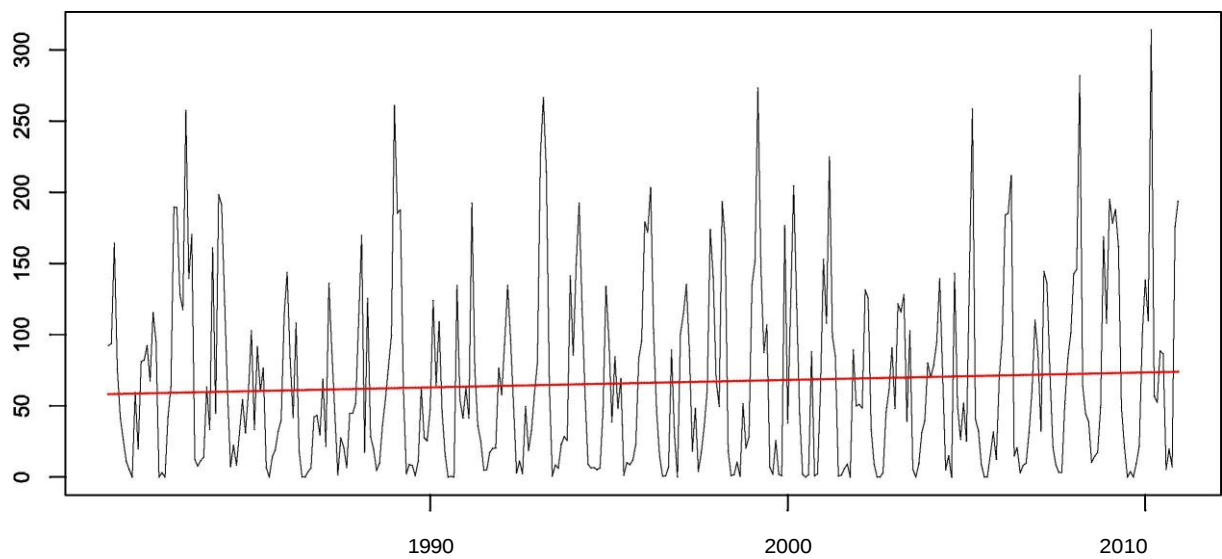
Mean-adjusted base series

M0419 GIRON

Base anomaly series and regression fit

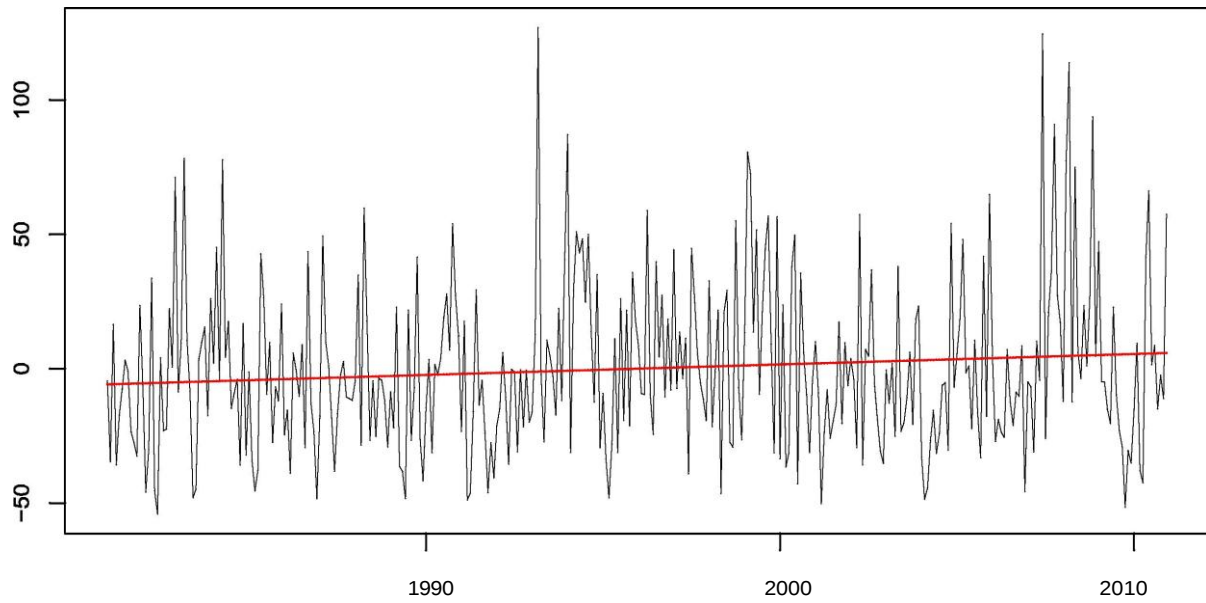


Base series and regression fit

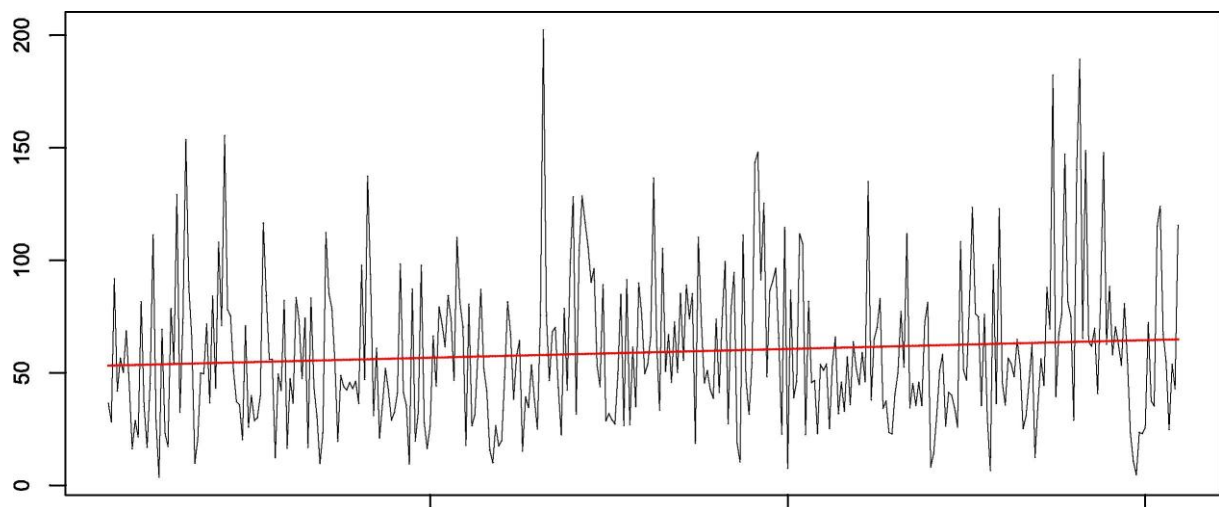


Mean-adjusted base series

M0424 SIGSIG INAMHI

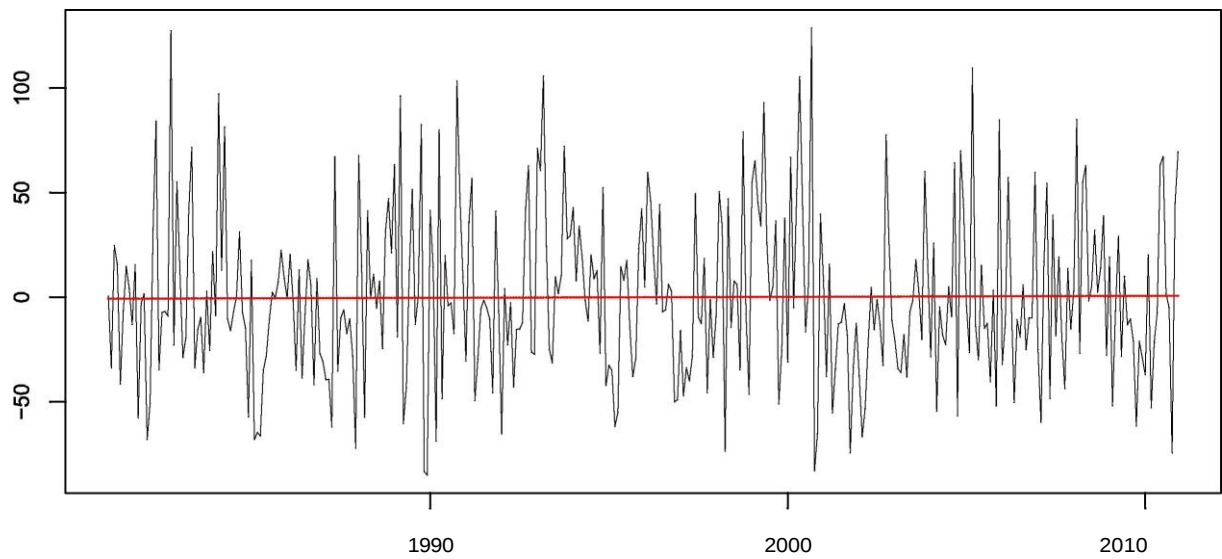


Base series and regression fit

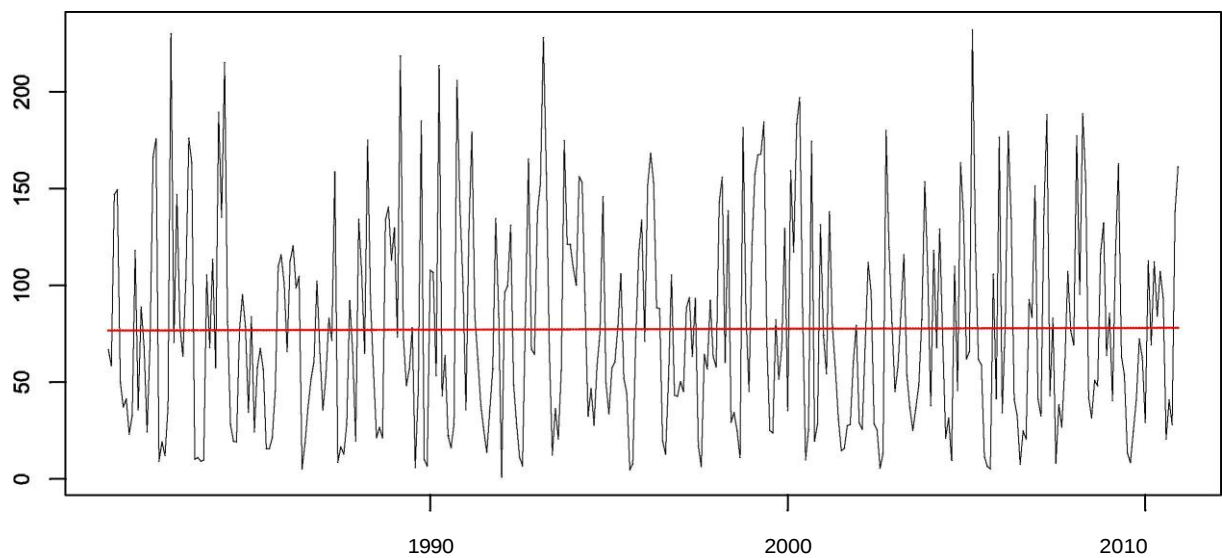


M0426 RICAURTE-CUENCA

Base anomaly series and regression fit

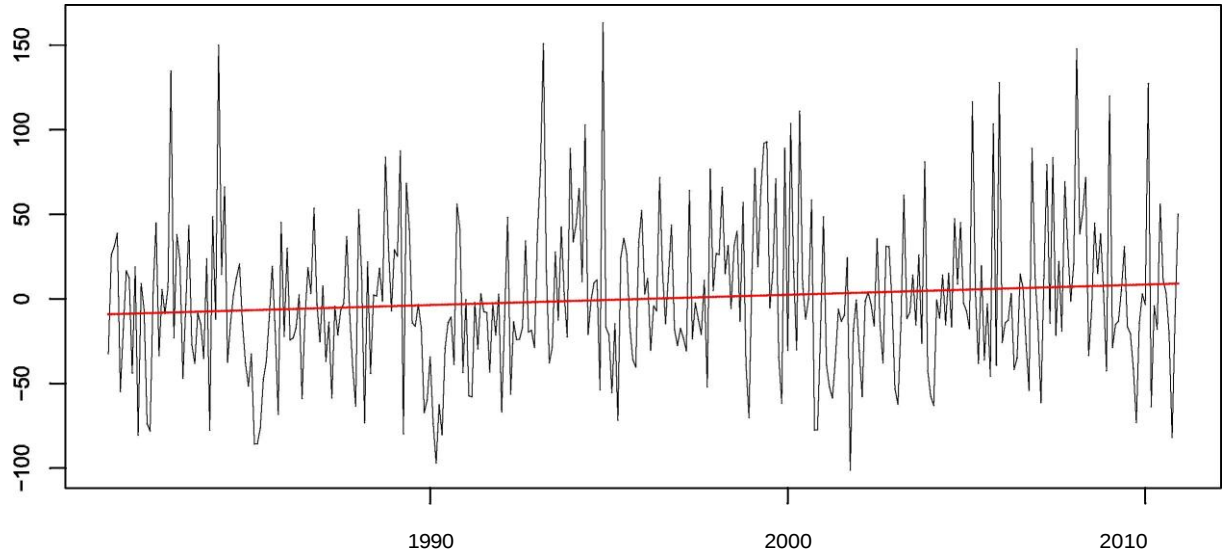


Base series and regression fit

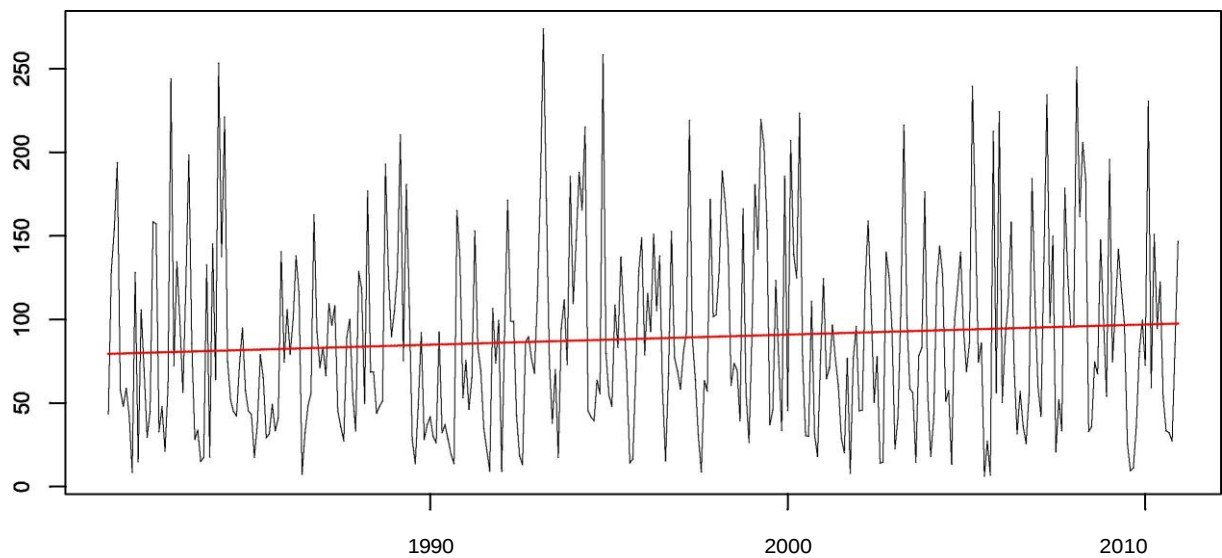


M0427 SAYAUSI MATADERO DJ

Base anomaly series and regression fit

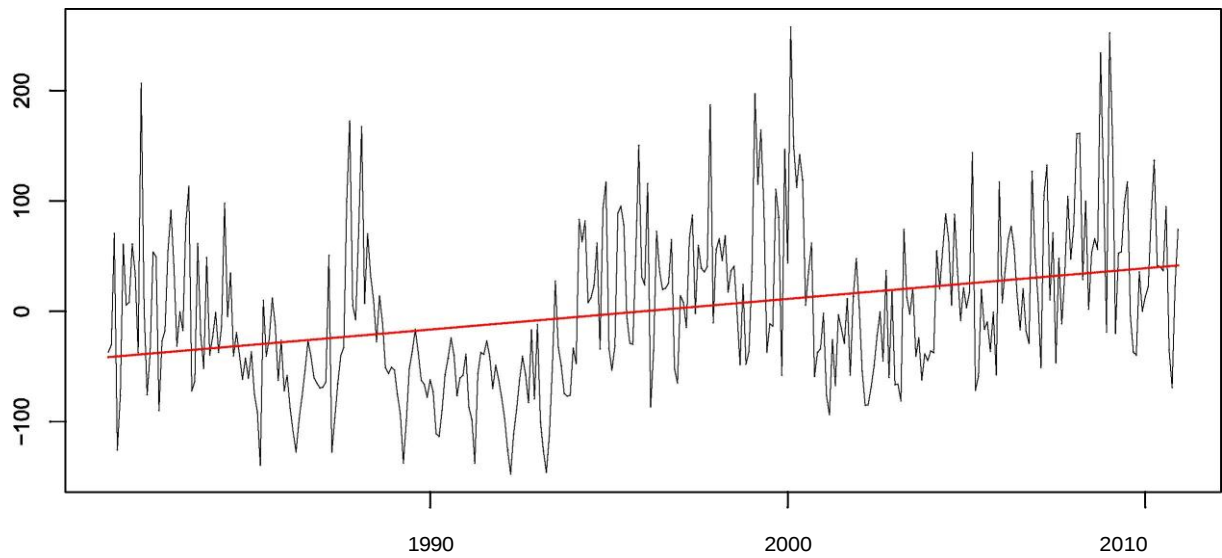


Base series and regression fit

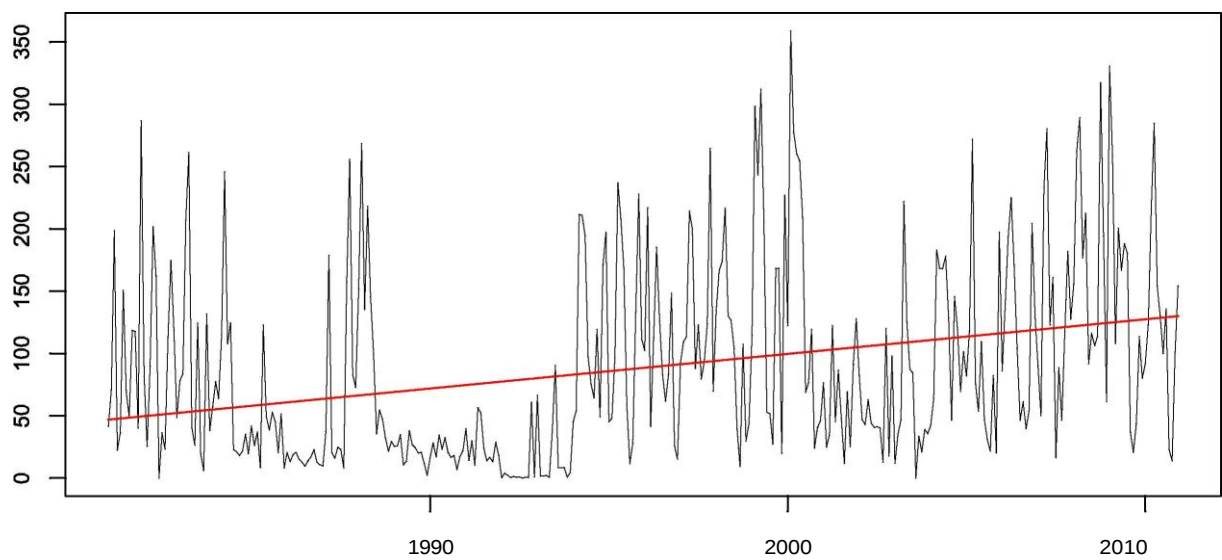


M0429 SURUCUHO LLULLUCHUY

Base anomaly series and regression fit

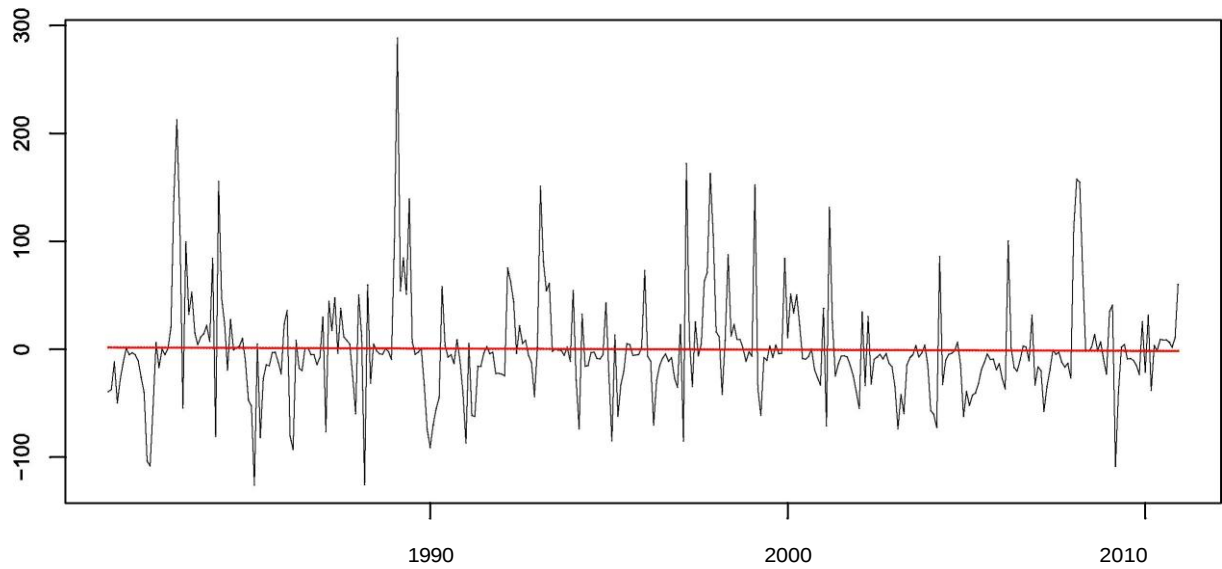


Base series and regression fit

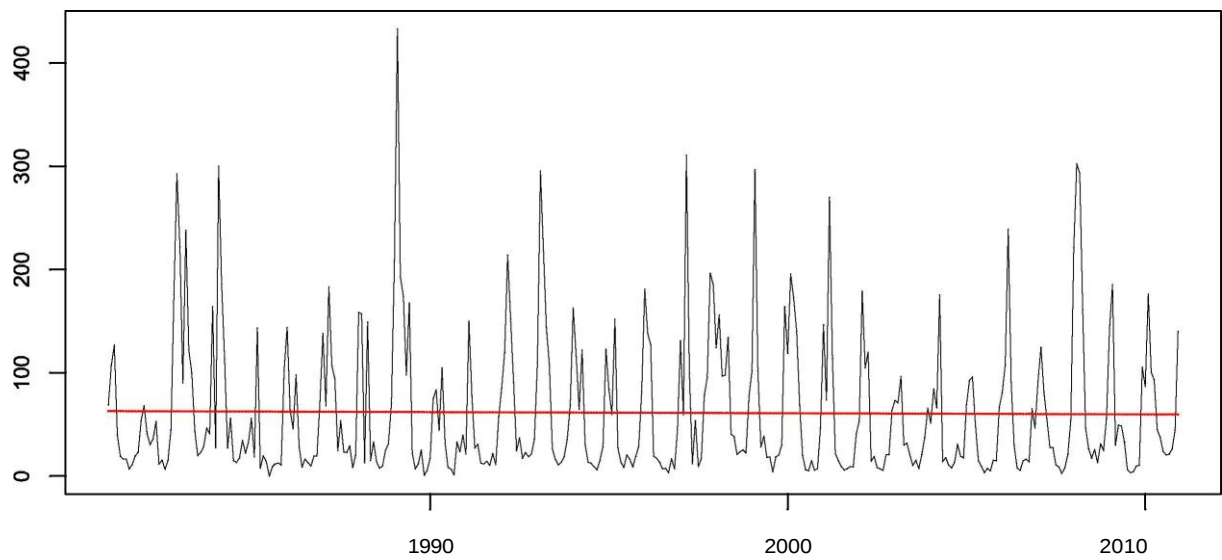


M0481 SEVILLA DE ORO

Base anomaly series and regression fit

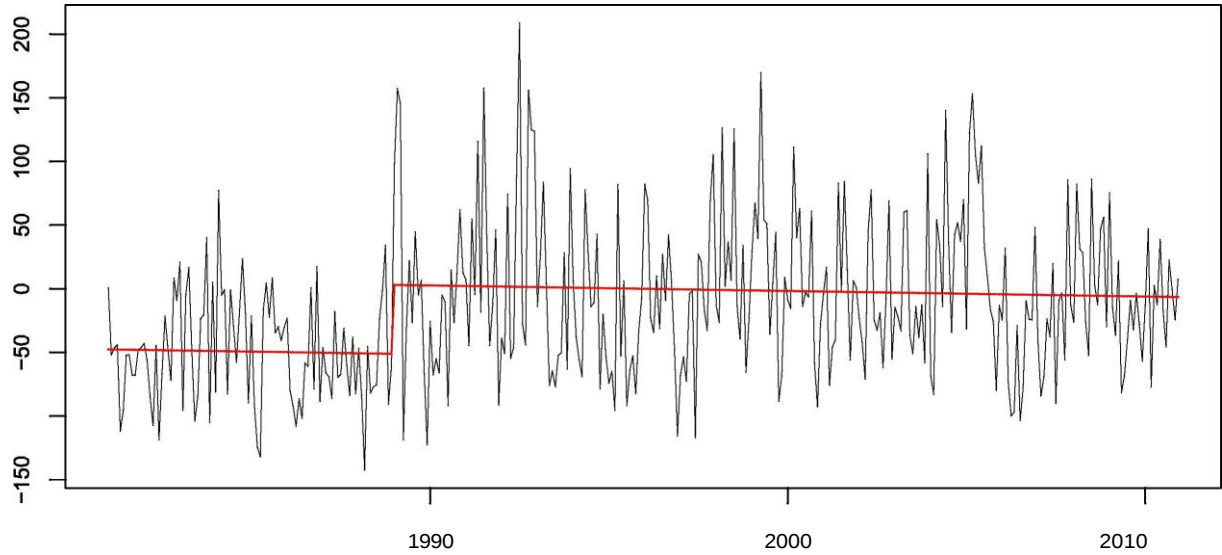


Base series and regression fit

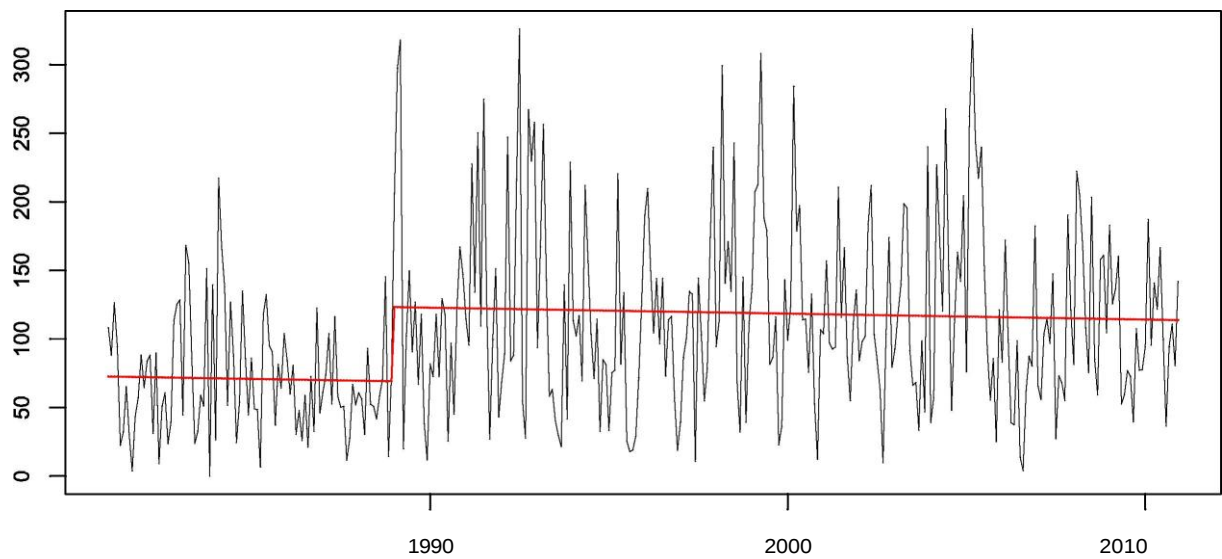


M0432 SAN LUCAS

Base anomaly series and regression fit

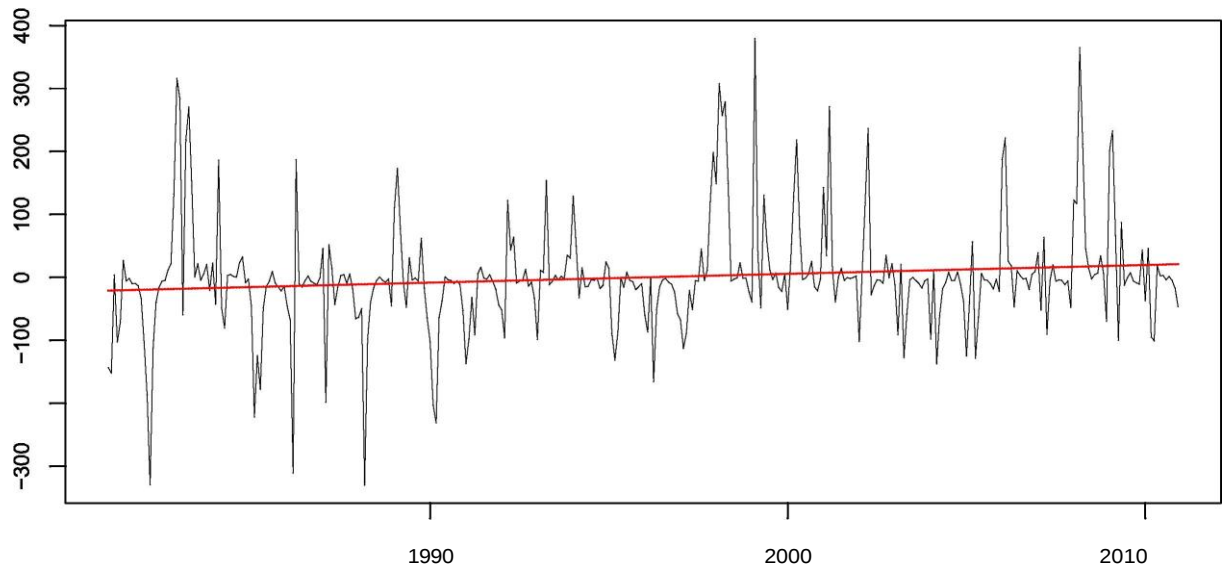


Base series and regression fit

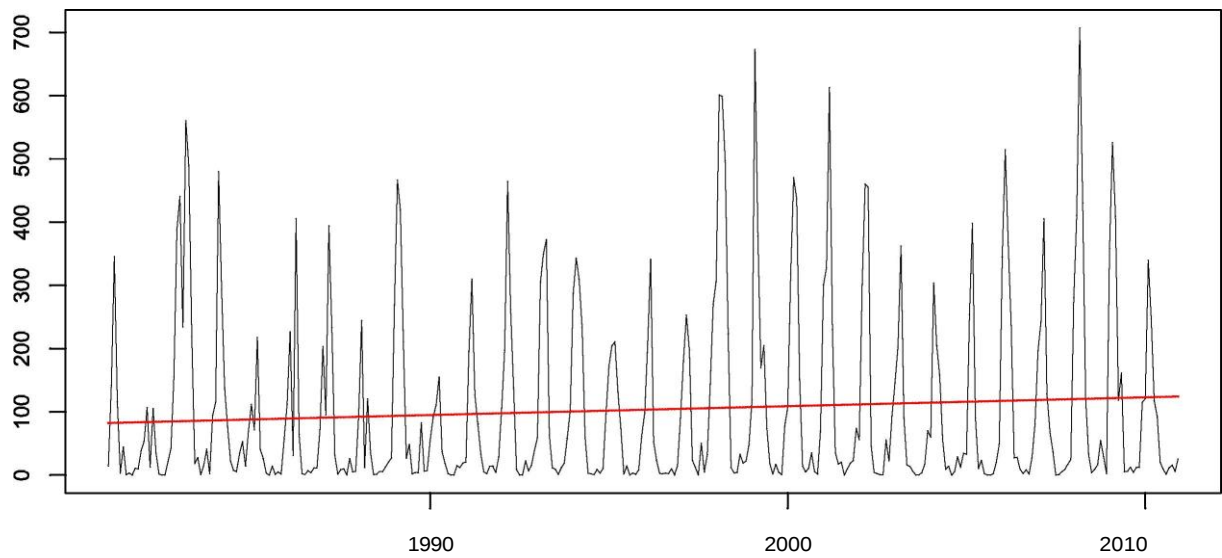


M0434 SOZORONGA

Base anomaly series and regression fit

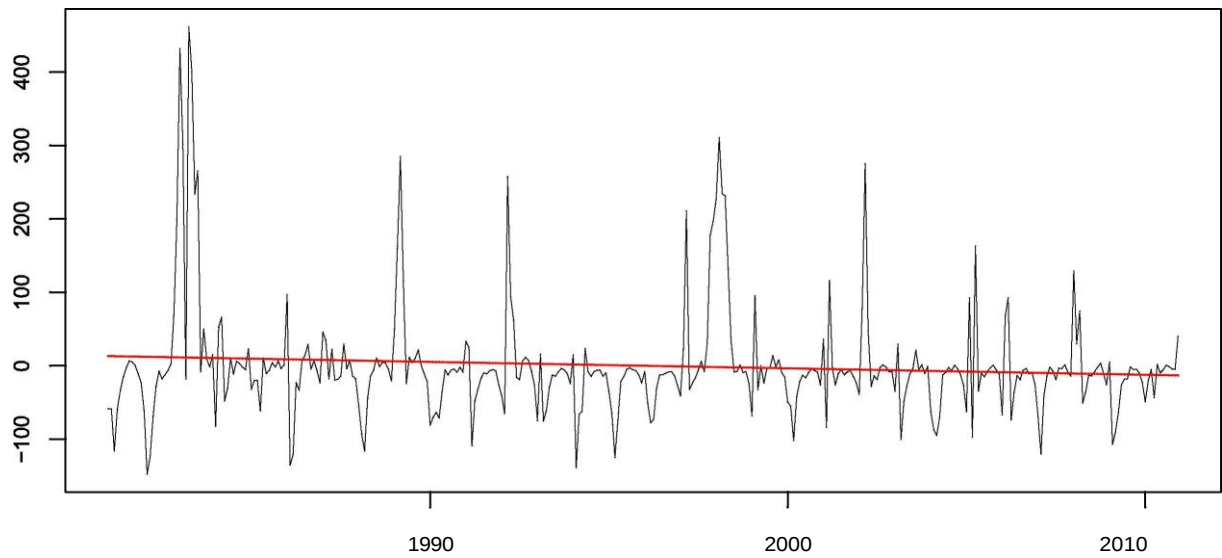


Base series and regression fit

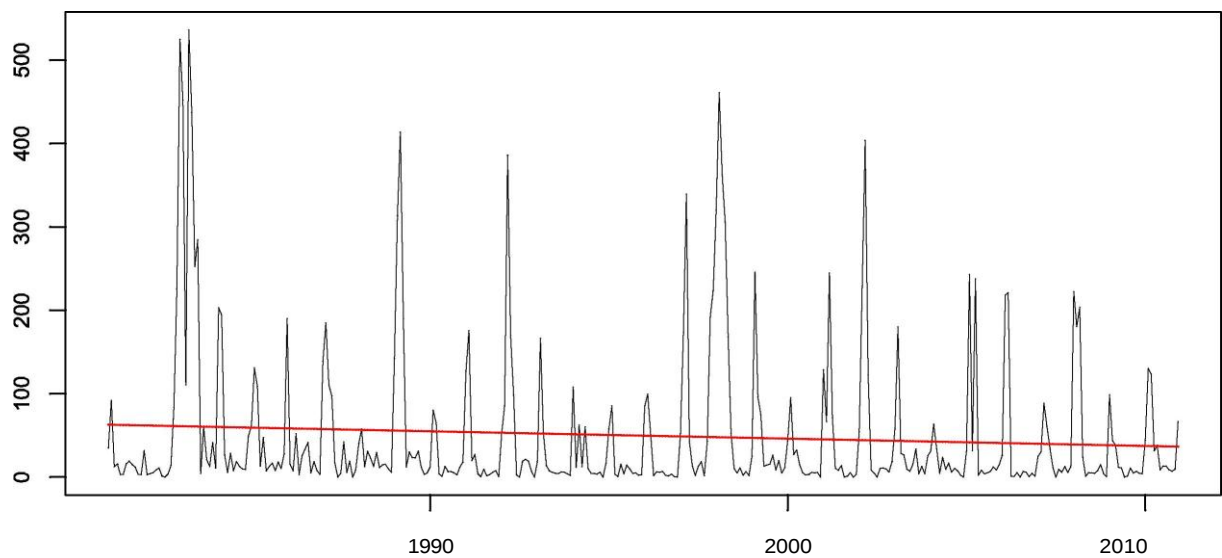


M0453 CHORRILLOS

Base anomaly series and regression fit

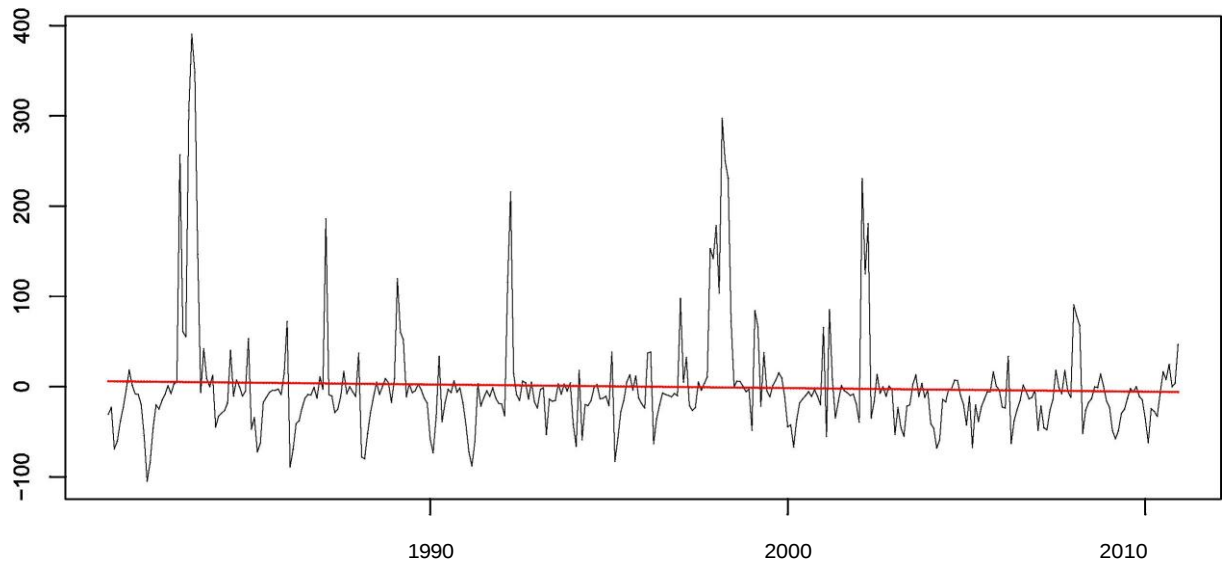


Base series and regression fit

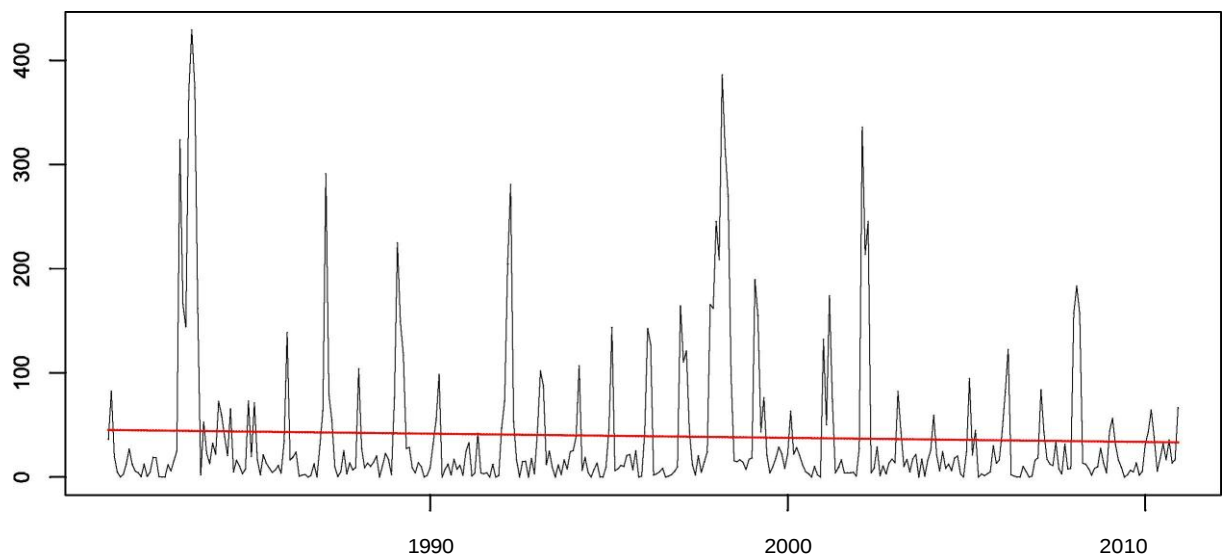


M0457 PUERTO CAYO

Base anomaly series and regression fit

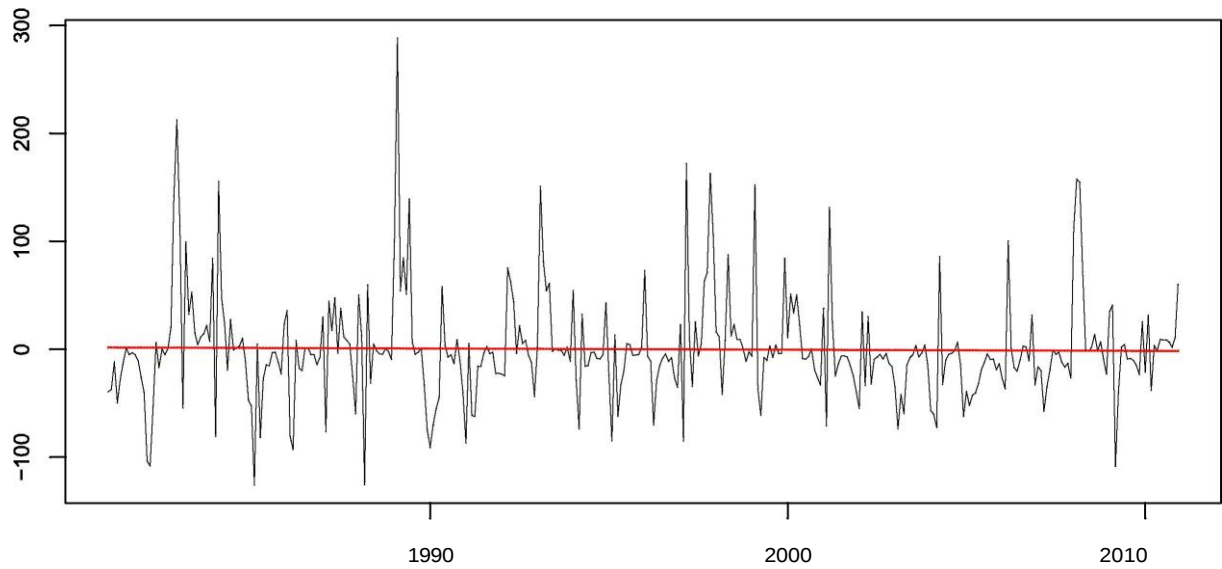


Base series and regression fit

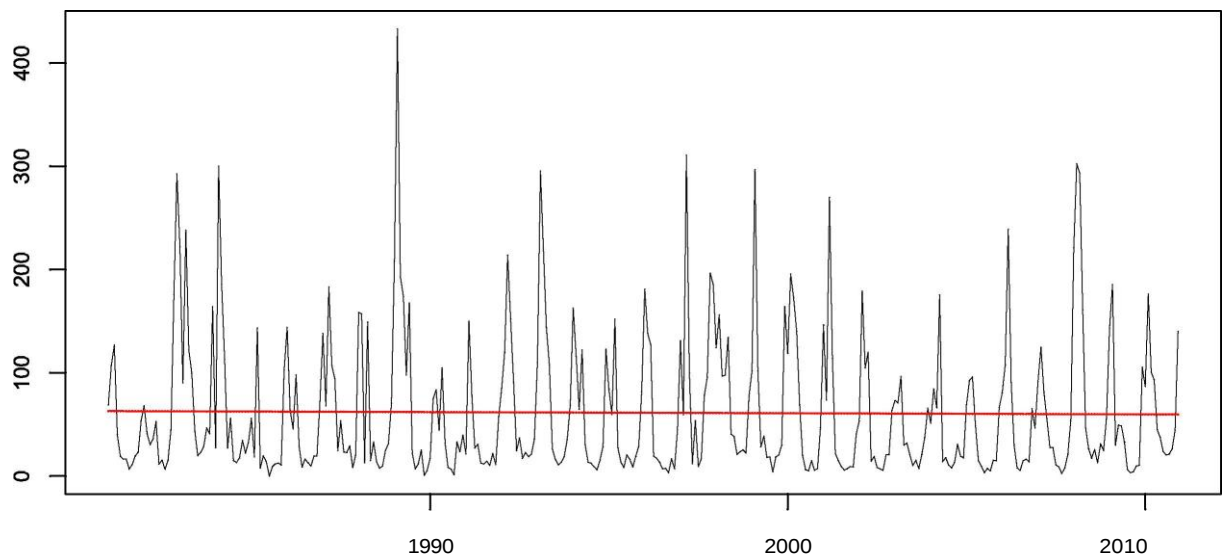


M0481 USHCHIRRUMI

Base anomaly series and regression fit

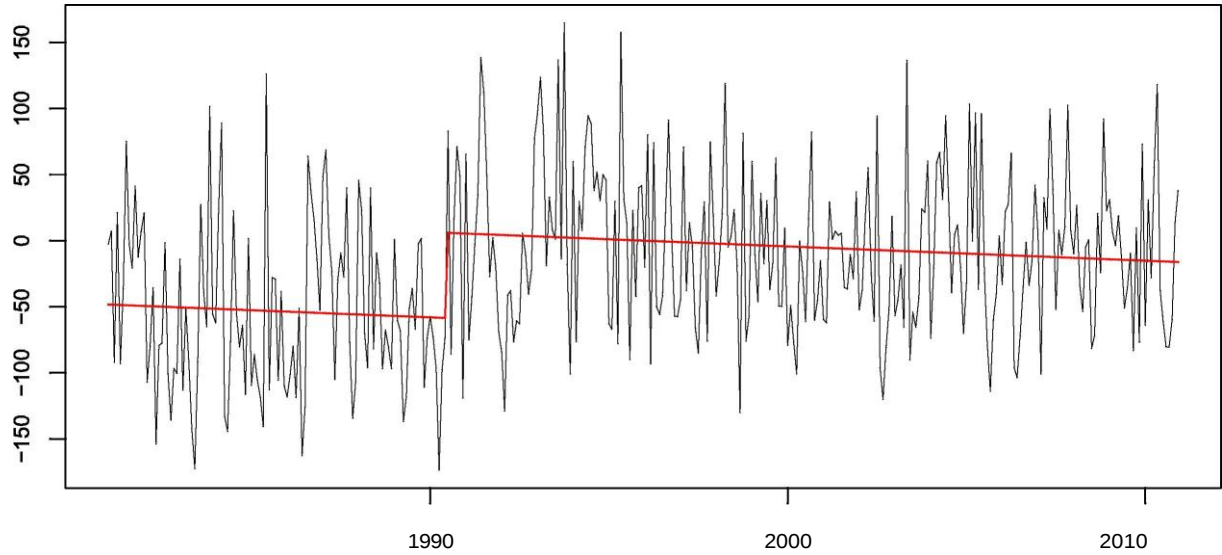


Base series and regression fit

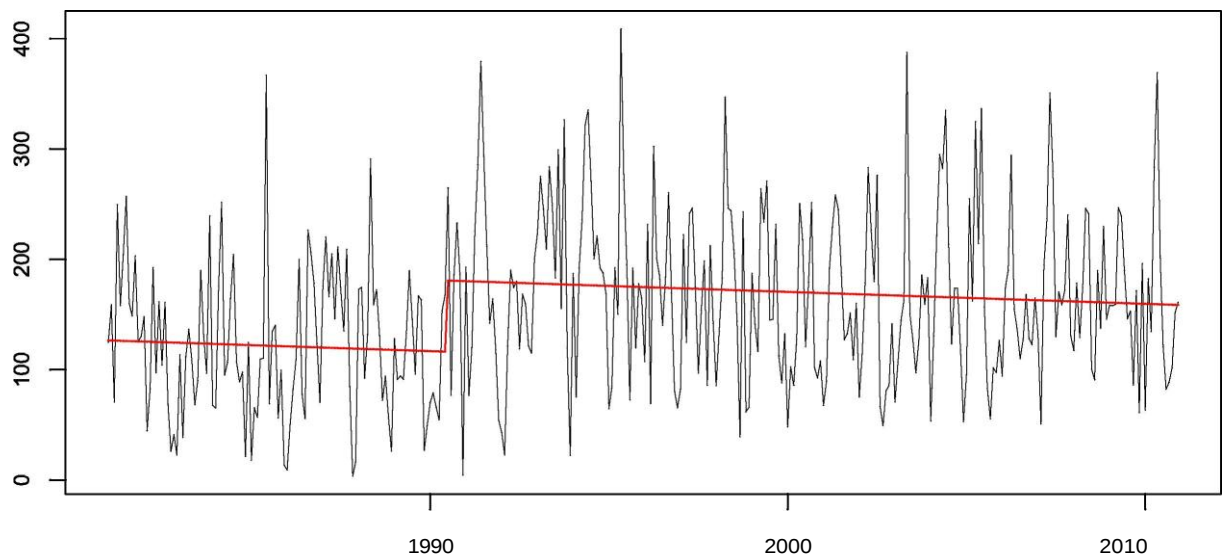


M0497 LOGROÑO

Base anomaly series and regression fit

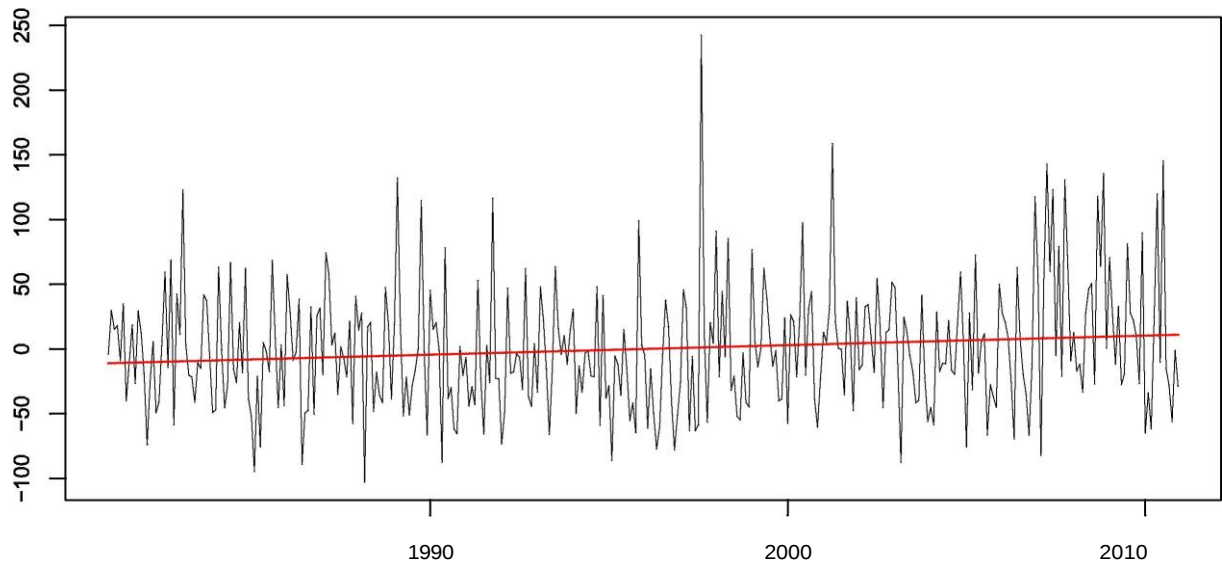


Base series and regression fit

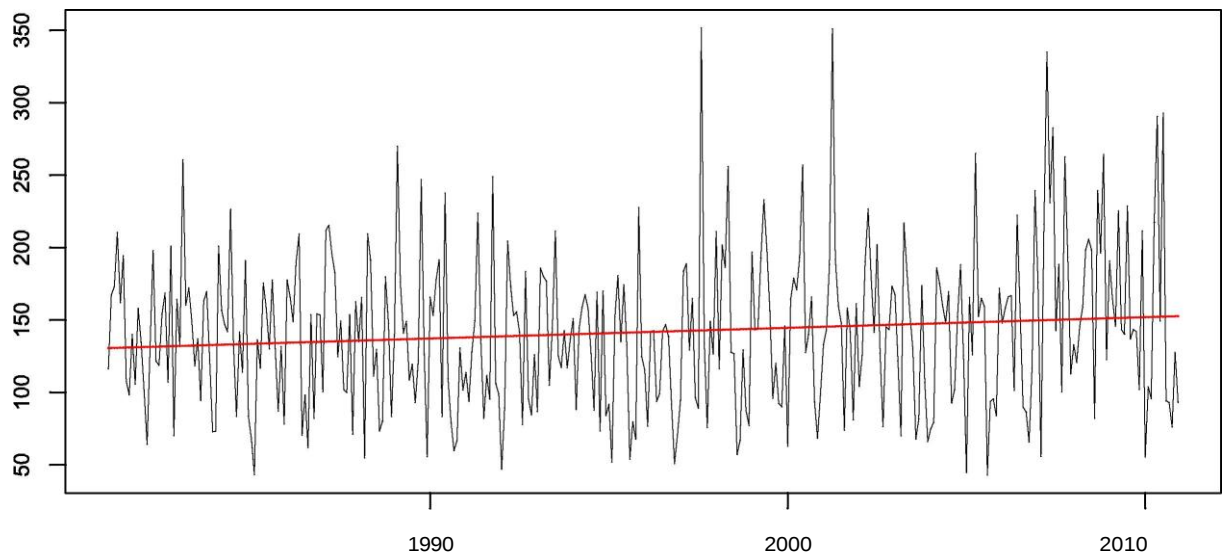


M0502 EL PANGUI

Base anomaly series and regression fit

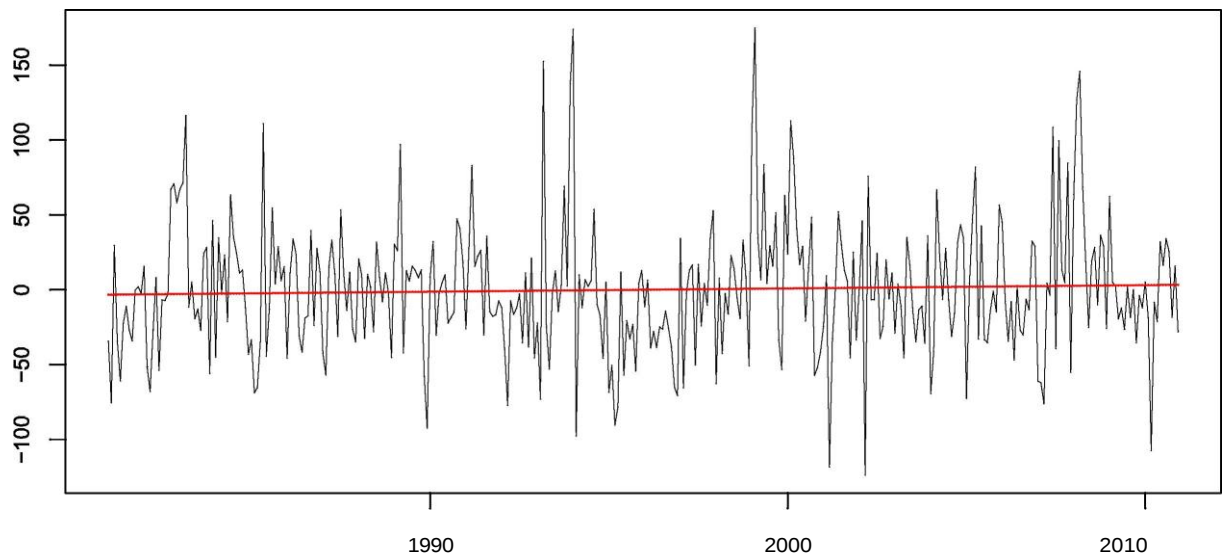


Base series and regression fit



M0543 CAJARUMA-LOJA

Base anomaly series and regression fit



Base series and regression fit

