



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Facultad de Ingeniería

Carrera de Ingeniería Civil

“Evaluación de la precipitación mensual en el Ecuador según los modelos globales de clima del CMIP5 y de modelos regionales de clima de alta resolución”

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniera Civil.

Autora:

Luz Gabriela Espinoza Brito

CI: 1400630842

Tutor:

PhD Lenin Vladimir Campozano Parra

CI: 0102677200

Cuenca, Ecuador

24/04/2019



Resumen:

El cambio en patrones de precipitación afecta económicamente y ambientalmente a la sociedad. Por esta razón, contar con proyecciones de lluvia permitirá realizar una mejor planificación para el uso del agua y así evitar los daños producto de sequías e inundaciones. La presente tesis está orientada en evaluar en el Ecuador en el presente, la precipitación generada por tres modelos globales de clima del IPCC AR5 y sus respectivos resultados de reducción de escala dinámica mediante un modelo regional de clima (WRF). Se evaluaron métricas estadísticas como: correlación, raíz del error medio cuadrático (RMSE) y desviación estándar, para caracterizar su desempeño en la región Ecuatoriana. La interpretación de los resultados mostró que los modelos globales y regionales tienen baja representatividad en zonas orientales y en las hoyas del valle interandino. Las reducciones de escala de los modelos mostraron una relativa superioridad en todas las métricas utilizadas. En conclusión, los modelos globales evaluados no permiten tener buenos pronósticos de precipitación dada la variabilidad climática y orográfica del Ecuador. Por otro lado, los resultados de modelación regional aumentan la calidad de los datos pero en las mismas zonas que los modelos globales presentan una resolución adecuada. Una reducción de escala mayor, aumentar el monitoreo con series de precipitaciones comparables y análisis por regiones climáticas, ayudaría a entender mejor el comportamiento de la lluvia en las regiones de la Sierra y el Oriente donde aún no se cuenta con la representatividad del clima esperada.

Palabras claves: Cambio climático. Modelos climáticos globales. Modelos climáticos regionales. Precipitación. Correlación. RMSE. Diagrama de Taylor.



Abstract:

The change in precipitation patterns affects society economically and environmentally. For that reason, having rainfall projections will allow better planning for water use and thus avoid damages caused by droughts and floods. The present thesis is oriented to evaluate in Ecuador in the present, the precipitation generated by three global climate models of the IPCC AR5 and their respective dynamically downscale results by means of a regional climate model (WRF). Several statistical metrics were evaluated, e.i, correlation, root mean square error RMSE and standard deviation to characterize the performance in the Ecuadorian region. The interpretation of the results showed that the global and regional models have low representatives in eastern zones and in valleys of the inter-Andean valley. Models downscaled results showed relative superiority in all metrics used, but where are most reliable is on the coast and the western part of the Western Cordillera. In conclusion, the global models evaluated do not allow having an adequate representation of precipitation given the climatic and orographic variability of Ecuador. On the other hand, the results of regional modeling increase the quality of the data but in the same areas that the global models present an adequate resolution. A larger scale reduction, increase the monitoring with comparable series of precipitation and analysis by climatic regions, would help us to better understand the behavior of rain in the regions of the Sierra and the Orient where the representativeness of the expected climate.

Keywords: Climate change. Global climate models. Regional climate models. Precipitation. Correlation. RMSE. Taylor Diagram.



ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	12
Antecedentes	15
Justificación	16
OBJETIVOS	17
1. MARCO TEÓRICO.....	19
1.1 TERMINOLOGÍA BÁSICA	19
1.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS TRES MODELOS DEL CMPI5 UTILIZADOS.	25
1.3 MODELO REGIONAL DE CLIMA Weather Research and Forecasting (WRF).....	27
2. DATOS Y ÁREA DE ESTUDIO.....	30
2.1 REGIÓN DE ESTUDIO	30
2.2 CLIMATOLOGÍA DEL ECUADOR.....	32
2.3 DATOS.....	37
3. MÉTODOS.....	44
3.1 CONTROL DE CALIDAD DE LAS OBSERVACIONES Y EXTRACCIÓN DE SERIES DE PRECIPITACIÓN DE LOS MODELOS GLOBALES Y REGIONALES.	45
3.1.1 Control de calidad de las observaciones.	45
3.1.2 Extracción de series de tiempo	46
3.2 CRITERIOS PARA LA ZONIFICACION DEL DESEMPEÑO DE LOS M-GCM Y W-RCM	46
3.2.1 Coeficiente de Correlación	46
3.2.2 Raíz del error cuadrático medio (RMSE)	47
<i>Ft = media de la serie de tiempo del modelo</i>	¡Error! Marcador no definido.
3.3 CRITERIOS PARA LA EVALUACIÓN COMPARATIVA.....	48
3.3.1 Diagrama del Taylor.....	48
3.3.2 Habilidad del diagrama de Taylor.....	50
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	53
4.1 ZONIFICACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LOS M-GCM.....	53
4.1.1 Evaluación por coeficiente de correlación de Pearson para el desempeño de los M- GCM 54	
4.1.2 Evaluación por la Raíz del error cuadrático medio (RMSE)	56
4.2 ZONIFICACIÓN DE LOS W-WRF.....	60
4.2.1 Evaluación por el Coeficiente de correlación de Pearson	60
4.2.2 Evaluación mediante la raíz del error cuadrático medio	63



4.3	EVALUACIÓN COMPARATIVA	64
4.3.1	Resultados Generales	65
4.3.2	Comparación de la correlación entre los M-GCM y W-RCM.....	65
4.3.3	Comparación del RMSE entre los 6 modelos climáticos	69
4.3.4	Diagrama de Taylor y la métrica de la habilidad de los modelos	73
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	78
5.1	CONCLUSIONES	78
5.2	RECOMENDACIONES	80
	BIBLIOGRAFÍA	82



ÍNDICE DE CUADROS

TABLA 1: Tipos de clima según Köppen.....	21
TABLA 2: Modelos de Clima del CMIP5 utilizados.....	25
TABLA 3: Estaciones utilizadas en la evaluación de los modelos climáticos.....	38
TABLA 4: Esquema de la metodología	44
TABLA 5: Resultados generales del coeficiente de correlación por regiones.....	56
TABLA 6: Resultados del RMSE para las regiones del Ecuador.....	57
TABLA 7: Resultados generales por regiones geográficas.....	61
TABLA 8: Resultado del RMSE por regiones geográficas del Ecuador.....	63
TABLA 9: Resultados generales de los estadísticos evaluados	65
TABLA 10: Conteo de Mejoras en los WRF	69
TABLA 11: Conteo de las mejoras por regiones	73



ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: Modelo de tres celdas y dirección de vientos.....	20
FIGURA 2: Regiones Geográficas del Ecuador Continental.....	31
FIGURA 3: Precipitación anual en el Ecuador periodo 1981-2005.....	33
FIGURA 4: Regímenes de lluvia y pluviometría del Ecuador periodo 1965-1978.....	34
FIGURA 5: Zonas climáticas del ecuador.	36
FIGURA 6: Mapa de estaciones meteorológicas del Ecuador utilizadas para la evaluación de los modelos climáticos.	39
FIGURA 7: Representación espacial del Ecuador de tres de modelos globales del CMIP5 utilizados en la TCN.	40
FIGURA 8: Representación de la topografía del WRF a 10km.....	41
FIGURA 9: Dominios simulados con WRF.....	42
FIGURA 10: Ley de cosenos.	48
FIGURA 11: Diagrama de Taylor.	50
FIGURA 12: Rangos de correlación y asignación de círculos a cada modelo.	54
FIGURA 13: Mapa de comparación del coeficiente de correlación entre los M-GCM.....	55
FIGURA 14: Rangos de RMSE y asignación de círculos a cada modelo	57
FIGURA 15: Mapa de comparación del RMSE entre los M-GCM.....	59
FIGURA 16: Mapa de comparación de correlación de los W-RCM.	62
FIGURA 17: Mapa comparativo del RMSE entre los W-RCM.	64
FIGURA 18: Mapa de comparación de la correlación entre el modelo M-CSIRO y W- CSIRO	66
FIGURA 19: Comparación de la correlación entre los modelos M-GISS y W-GISS	67
FIGURA 20: Comparación de la correlación de los modelos M-IPSL y W-IPSL.....	68
FIGURA 21: Mapa comparativo del RMSE del modelo W-CSIRO y M-CSIRO.	70
FIGURA 22: Mapa Comparativo del RMSE del modelo W-GISS y M-GISS.....	71
FIGURA 23: Mapa comparativo del RMSE del modelo W-ISPL y M-ISPL.	72
FIGURA 24: Diagrama de Taylor de los 3 GCM y 3 WRF.....	74
FIGURA 25: Diagrama de la habilidad de Taylor para los M-GCM.....	75
FIGURA 26: Diagrama de la habilidad de Taylor para los W-RC	76



ACRÓNIMOS UTILIZADOS

AFWA: Agencia de tiempo de la fuerza Aérea de Estados Unidos

AR5: Quinto informe de evaluación

CC: Cambio Climático

CFSR: Sistema de pronóstico y re-análisis del clima

CMCC: Convención Macro de las Naciones Unidas sobre el CC

CMIP5: Proyecto de intercomparación de modelo acoplado Fase 5

CSIRO: Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation / Organización de Investigación Científica e Industrial del Commonwealth

DOWNSCALING: Reducción de escala

DEM: Modelo Digital de Elevaciones

ESM: Modelos de Sistemas Terrestres

FAA: Administración Federal de Aviación de Estados Unidos

GCM: Modelo de Circulación Global

GISS: Instituto Goddard de Estudios Espaciales de la NASA

IPCC: Panel Intergubernamental de CC

INAMHI: Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador

IPSL: Instituto Pierre Simon Laplace

LAM: Modelo de área limitada

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

M-GCM: Modelos Regionales de Clima de Estudio

MCGAAO: Modelo de Circulación Global Acoplado Océano-Atmosfera

NCAR: Centro Nacional de Investigación Atmosférica de Estados Unidos

PRECIS: Proporcionando Climas Regionales para Estudios de Impactos
(Providing Regional Climates for Impacts Studies)

RCM: Modelo de Circulación Regional

RMSE: Raíz del Error Medio Cuadrático

RCP: Trayectorias de Concentración Representativas



SRES: Escenarios de Emisiones

WRF: Weather Research and Forecasting / Investigación y Predicción del Clima

W-RCM: Modelos Globales de Clima de Estudio

ZCIT: Zona de Convergencia Intertropical.



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Luz Gabriela Espinoza Brito en calidad de autora y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Evaluación de la precipitación mensual en el Ecuador según los modelos globales de clima del CMIP5 y de modelos regionales de clima de alta resolución", 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, 18 de abril de 2019

Luz Gabriela Espinoza Brito

C.I: 1400630842



Cláusula de Propiedad Intelectual

Luz Gabriela Espinoza Brito, autora del trabajo de titulación “Evaluación de la precipitación mensual en el Ecuador según los modelos globales de clima del CMIP5 y de modelos regionales de clima de alta resolución”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autora.

Cuenca, 20 de abril de 2019

A handwritten signature in purple ink, appearing to read 'Luz Gabriela Espinoza Brito', written over a horizontal line.

Luz Gabriela Espinoza Brito

C.I: 1400630842



DEDICATORIA

Quisiera dedicar esta tesis a mi amada madre; por el apoyo de una vida, a la espera de mi felicidad, con su paciencia infinita. Y a la memoria de mi padre (1953 - 2002) que fue un gran maestro y un increíble padre.



AGRADECIMIENTOS

Me gustaría expresar mi gratitud a una serie de personas que me han apoyado de una u otra forma para poder terminar mi carrera. Comenzando por mis Hermanos por su amor y comprensión, a mi tía Moni que ha sido de gran apoyo emocional, y a toda mi familia y amigos que han estado atrás mío, insistiéndome y animándome a que continúe. Por último, a mí querido tutor por despertar mi interés en un tema tan bonito como es de la climatología, por su supervisión y dirección en el desarrollo de esta tesis.

INTRODUCCIÓN

La evidencia observacional indica que el “cambio climático” (CC) ha alterado la frecuencia, intensidad y longitud de muchos eventos meteorológicos (Jiménez García 2014). Valorar la incidencia del CC en el clima futuro, es la razón de la generación de proyecciones climáticas. Esto puede realizarse mediante herramientas de pronóstico y proyección del clima como son los “Modelos de Circulación Global” (GCM) (Rueda y García 2002). La eficiencia e incertidumbre de los GCM depende principalmente de los escenarios climáticos utilizados, los forzantes naturales y antrópicos, zona de estudio, escala de agregación y la formulación matemática (Cabré 2011). Por lo tanto, es necesario evaluar la incertidumbre de los GCM para un adecuado manejo de los recursos naturales y una fundamentada toma de decisiones. Además, para el estudio del impacto del CC a escala de cuenca hidrográfica, la reducción de escala dinámica mediante los “Modelos de Circulación Regional” (RCM) también debe ser evaluada en el clima presente.

En el Ecuador, por su ubicación en una zona tropical, es muy importante el aporte de la precipitación convectiva. Asimismo por su relieve, la precipitación tiene considerables efectos orográficos locales, lo cual limita la representación del clima en los GCM (Chacón y Vincenti 2011). Para mejorar esta representación es necesario realizar una “reducción de escala” (downscaling) que simule adecuadamente ya sea procesos o características estadísticas de la precipitación (Fernández et al. 2012). Así, los métodos de reducción de escala se pueden clasificar en estadísticos y dinámicos. Los estadísticos se basan en el desarrollo de relaciones cuantitativas de variables locales de superficie y variables atmosféricas a gran escala. Lo que supone que esta relación permanecerá constante en el futuro, no obstante este supuesto no es del todo verdadero (Guanuchi 2015). Los dinámicos en cambio utilizan un modelo de área limitada de alta resolución tomando en consideración procesos físicos, pero estos requieren de un alto uso computacional y de datos para condiciones iniciales y de contorno (Amador y Alfaro 2009).



En el desarrollo de la presente tesis se pretende evaluar la precipitación generada por tres GCM y sus respectivos resultados de downscaling dinámico mediante el modelo “Weather Research and Forecasting Model” (WRF), que los llamaremos W-RCM. Estos resultados de reducción de escala fueron obtenidos dentro de la cooperación interinstitucional de la Universidad de Cuenca con el Ministerio del Ambiente dentro del Proyecto de la “Tercera Comunicación Nacional” de Cambio Climático del Ecuador (TCN). El periodo que se analiza es 1981 – 2005. Mediante métricas estadísticas, se pretende zonificar el desempeño de los GCM y W-RCM con respecto a las observaciones. Finalmente se pretende evaluar los GCM y W-RCM comparativamente entre sí para así estudiar el valor agregado del procedimiento de reducción de escala dinámica.

Antecedentes

Los GCM son las herramientas más eficientes en la actualidad para el estudio del clima global. Sin embargo, a nivel local los GCM adolecen de muy baja resolución. A pesar de que los modelos incluidos en el IPCC AR5, los cuales serán utilizados en el presente estudio, consideren varios aspectos de interacción atmósfera-océano, atmósfera-flujos superficiales, criósfera y superficie de la tierra simulando matemáticamente la dinámica del sistema climático. Se deben considerar los campos de vientos para diferentes niveles, la presión media del nivel del mar como indicadores de la circulación atmosférica y, como resultados de estos patrones, la precipitación y temperatura media global. Para mejorar la representación de los procesos a escala local, una aproximación es la reducción de escala dinámica. Uno de los modelos de mayor uso es el modelo dinámico de investigación y predicción meteorológico WRF. Este resuelve a través de parametrizaciones, procesos de micro-escala y meso-escala en la atmósfera a partir de datos globales (Higueras et al. 2012). Es el modelo de última generación, eficiente y con buena resolución (Moya y Ortega 2015).

En cuanto al rendimiento de los métodos de reducción de escala en el país existen pocos estudios previos. Buytaert et al. 2010, aplicaron el modelo climático regional PRECIS (Providing Regional Climates for Impacts Studies) a



50 km de resolución y lo compararon con el modelo AR4 del “IPCC” (Intergovernmental Panel on Climate Change) en la zona de los Andes tropicales del Ecuador y concluyeron que es necesario un aumento adicional en la resolución para representar adecuadamente los gradientes locales. Al evaluar a 10 km de resolución, se espera disminuir las anomalías. Mora et al. 2014, emplean downscaling estadístico del IPCC sobre “escenarios de Emisiones del IPCC AR4” (SRES) en la cuenca del Paute y expresa un aumento en las precipitaciones en todos los escenarios. También, Ochoa et al. 2016, valoran la generación de la precipitación de una red neural artificial estadística y un enfoque dinámico WRF. Advierten, la estacionalidad de la lluvia representada, superó la de los datos de re-análisis, mejorando las observaciones. Sin embargo, encontraron deficiencias en las estimaciones de la cantidad. Al evaluar en todo el territorio ecuatoriano se espera ampliar este enfoque. Campozano et al. 2017, evaluaron índices climáticos extremos de los GCM CMIP3&5 y ensayos de re-análisis para clima en los Andes del Ecuador. Identificaron una sobreestimación consistente de los índices climáticos extremos, especialmente los índices que reflejan cantidad tienen una representación inferior a los que representan frecuencia. Este resultado puede estar relacionado con la representación limitada de los procesos convectivos por los GCM.

Justificación

El contar con modelos de clima acertados, desempeña un papel importante en la toma de decisiones y en la mitigación de los efectos del CC en la economía del Estado, lo cual motiva la evaluación de los modelos globales y modelos regionales de clima.

En el Ecuador, por su ubicación tropical y la influencia de su sistema montañoso, es importante evaluar la fiabilidad de los GCM ya que estos factores presentan dificultades para su modelación. Estas limitaciones son ampliadas por el poco monitoreo de las variables climáticas en el país. Para la evaluación en tiempo presente es necesario también estudiar el resultado de los métodos de downscaling dinámico ya que estos han demostrado mejorar la representación de las variables climáticas de los GCM. Luego de la evaluación



se puede tener una mayor noción del desempeño de los modelos climáticos, ya sean globales o regionales, para así tener una toma de decisiones fundamentada.

OBJETIVOS

Objetivo General

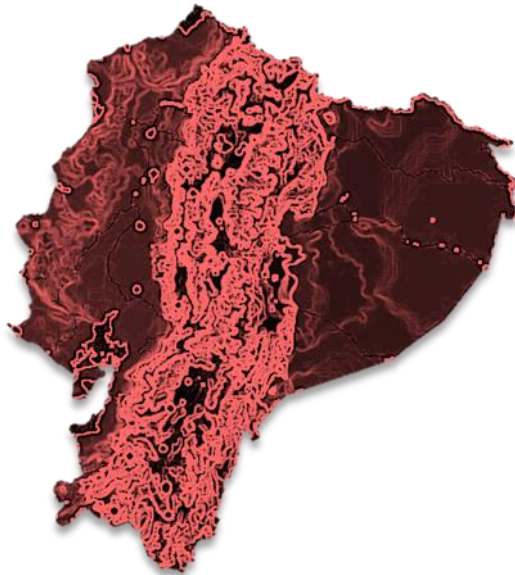
Evaluar la precipitación mensual en el territorio ecuatoriano según los Modelos Globales de Clima del CMIP5 y de la reducción de escala dinámica mediante WRF a 10 km de resolución.

Objetivos específicos

1. Zonificación nacional del desempeño de los modelos globales, CSIRO-Mk3, GISS-E2-R, IPSL-CM5A-MR en el periodo 1981-2005.
2. Zonificación nacional del desempeño de los modelos regionales, CSIRO-Mk3, GISS-E2-R, IPSL-CM5A-MR en el periodo 1981-2005.
3. La evaluación comparativa del desempeño de los modelos M-GCM y W-RCM.

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO



1. MARCO TEÓRICO

1.1 TERMINOLOGÍA BÁSICA

Clima y Tiempo atmosférico

El Tiempo Atmosférico es un estado instantáneo de la atmósfera en un lugar determinado. Depende del comportamiento de la radiación, insolación, presión atmosférica, temperatura, humedad del aire, viento, nubosidad, evapotranspiración y precipitación. Es variable en el tiempo y espacio (Martelo 2003).

El clima es un estado promedio del tiempo atmosférico, incluyendo su variabilidad en una región geográfica. El periodo de agregación para obtener este promedio es de varias décadas. La “Organización Meteorológica Mundial” (OMM) denomina “normales” a los promedios de 30 años (Martelo 2003).

Sistema climático

“Sistema muy complejo que consta de cinco componentes principales: atmósfera, hidrósfera, criósfera, litósfera y biósfera, y de las interacciones entre ellos. El sistema climático evoluciona en el tiempo bajo la influencia de su propia dinámica interna y por efecto de forzamientos externos, como las erupciones volcánicas o las variaciones solares, y de forzamientos antropogénicos, como el cambio de composición de la atmósfera o el cambio de uso del suelo”(IPCC 2015).

Celdas de circulación

La circulación general de la atmósfera es el movimiento del aire a escalas planetarias y sinóptica, su función en el sistema climático es tratar de compensar las desigualdades en la energía recibida en superficie, a través de redistribución de calor latente, calor sensible y momento angular (Martelo 2003). Este movimiento de masas de aire se puede explicar mediante tres celdas de circulación global observando la figura 1.

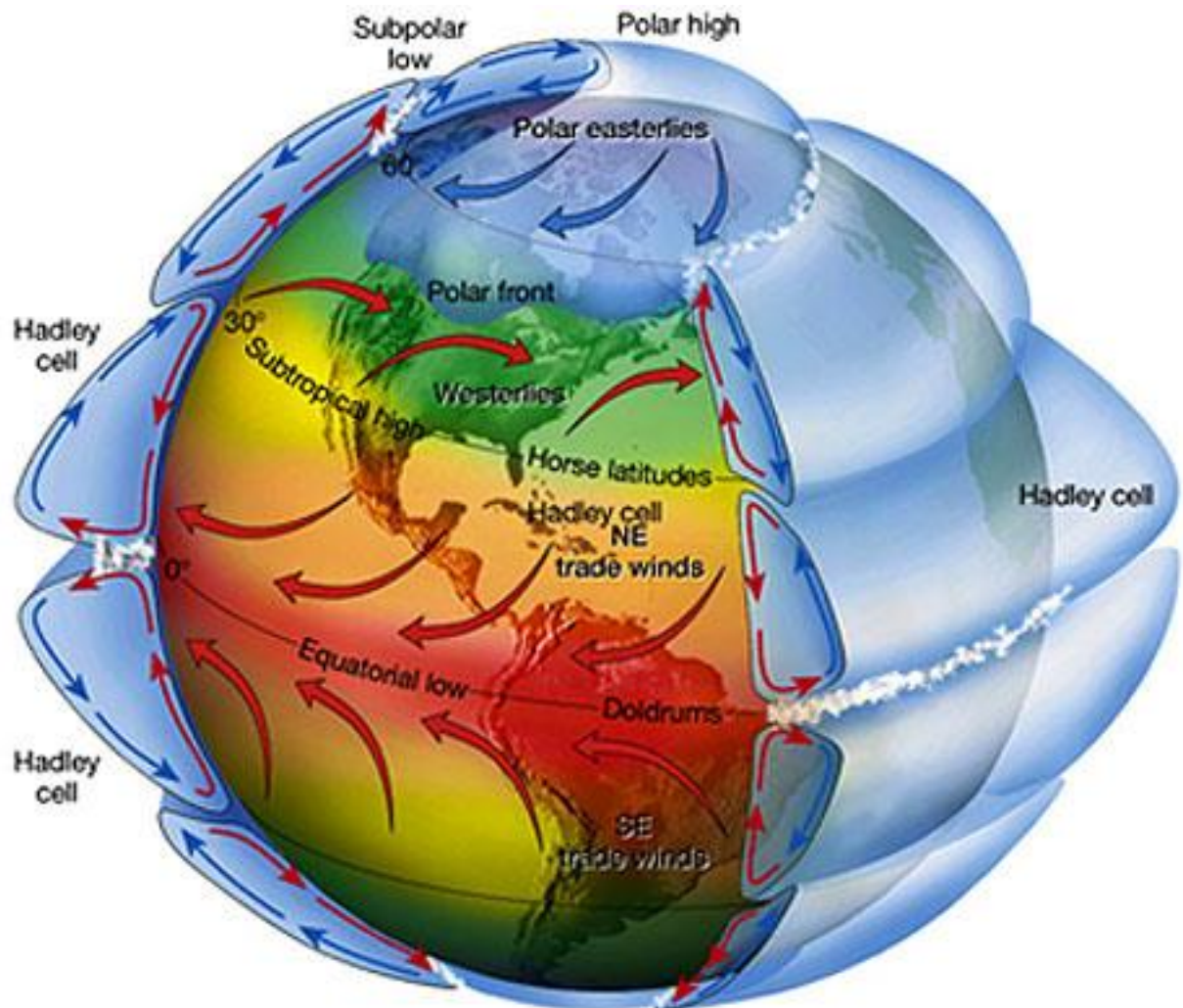


FIGURA 1: Modelo de tres celdas y dirección de vientos.
Fuente: Remote Sensing Tutorial NASA

- 1) Celdas de Hadley; entre el ecuador y aproximadamente los 30° de latitud sur y norte, se produce una circulación vertical, donde el aire más cálido que se eleva, se condensa liberando calor latente y formando grandes cúmulos y cumulonimbus que producen abundante precipitación. El aire de niveles superiores se mueve hacia los polos y entre 25-35° de latitud sur y norte.
- 2) Celdas de Ferrel; el aire enfriado, desciende nuevamente hacia la superficie cerca de los 30° de latitud, en donde se divide. Parte fluye hacia el Ecuador, a compensar el aire ascendente. En este trayecto es desviado por la fuerza de Coriolis generando los vientos Alisios. Otra parte del aire descendente se dirige hacia los Polos.

3) Celdas Polares; el aire frío de niveles superiores en las zonas polares genera subsidencia, produciendo por compresión altas presiones en superficie y divergencia. A su vez la divergencia produce un flujo de aire en superficie desde los polos hacia latitudes subpolares, que es desviado por la fuerza de Coriolis, generando un sistema de vientos conocidos como los Estes polares, entre los polos y los 60° de latitud y produce convección y flujo hacia los polos en altura (Inzunza 2010).

Tipos de clima según Köppen

Köppen 1930, clasificó los climas del mundo basándose en la temperatura del aire (T) y la cantidad de agua disponible, en relación con las características fitogeográficas (distribución de plantas sobre la Tierra). Esta clasificación climática, algebraica, al considerar valores numéricos y proporciones, y empírica, al considerar umbrales que condicionan la distribución de la vegetación, hace uso de un sistema de letras mayúsculas y minúsculas que denotan rasgos particulares de los climas. Distinguiendo cinco grupos climáticos principales, definidos por umbrales térmicos y de precipitación, que corresponden, grosso modo, a las grandes formaciones de vegetación. Estos climas son designados con las primeras letras del alfabeto, escritas en mayúscula como se destaca en la tabla 1: A, B, C, D y E.

TABLA 1: Tipos de clima según Köppen.

LETRA	UMBRAL TERMICO	CLIMA	TIPO DE VEGETACIÓN
A	$T > 18^{\circ}\text{C}$	Cálidos: tropical lluvioso, sabana y monzón	Bosque ecuatorial a selva tropical, Sabana
B	Evaporación > precipitación, $T > 18^{\circ}\text{C}$	Secos: áridos y semiáridos	Desierto, Estepa
C	$-3^{\circ} \geq T \leq 18^{\circ}\text{C}$	Templados: lluvias estacionales y todo el año	Bosque templado, Matorral
D	$-3^{\circ} \geq T \leq 10^{\circ}\text{C}$	Boreales: lluvias estacionales y todo el año.	Bosque de coníferas
E	$T < 10^{\circ}\text{C}$	Fríos: tundra y hielo	Tundra y ausencia de vegetación por hielo.

Cambio Climático

El Cambio Climático según el (IPCC 2014) es una variación del estado del clima que persiste a lo largo del tiempo atribuible a procesos internos naturales o forzamientos externos como: modulaciones de los ciclos solares, erupciones volcánicas o cambios antropógenos persistentes de la composición de la atmósfera o del uso del suelo. Existe una diferencia entre CC atribuible a actividades humanas y la variabilidad del clima atribuible a causas naturales. El CC se acelera debido al calentamiento global que denota el aumento gradual, observado o proyectado, de la temperatura global en superficie producto de las emisiones de gases de efecto invernadero.

Herzog et al. 2012 advierten que durante el siglo XX se han registrado variaciones en la precipitación en diferentes regiones geográficas. Se considera a los Andes, con sus ecosistemas altamente diversos, una de estas regiones, que podría verse alarmantemente deteriorado con un aumento en la temperatura superficial media, desaparición de glaciares en Colombia, Ecuador, Perú y Bolivia (Vuille et al. 2008), como resultado de periodos de sequía más lluvias intensas que generan inundaciones (Buytaert et al. 2010).

Escenarios de emisiones

Representación de la evolución futura de las emisiones de sustancias que podrían ser radiactivamente activas como gases de efecto invernadero y aerosoles y relacionada con los factores que las impulsan como el desarrollo demográfico y socioeconómico, el cambio tecnológico, la energía y el uso del suelo obteniendo escenarios de concentraciones que se introducen en un modelo climático para conseguir proyecciones climáticas. Las “trayectorias de concentración representativas” (RCP) utilizan cuatro trayectorias distintas. Un escenario de mitigación estricto (RCP2,6) con una trayectoria en la que el forzamiento radiativo alcanzará el valor máximo a aproximadamente 3W/m^2 antes del año 2100 y posteriormente disminuirá, dos escenarios intermedios (RCP4,5 y RCP6,0) con trayectorias de estabilización intermedias en las cuales el forzamiento radiativo se estabilizará a aproximadamente $4,5\text{ W/m}^2$ y $6,0\text{ W/m}^2$ después de 2100, y un escenario con un nivel muy alto de emisiones de gases de efecto invernadero (RCP8,5) trayectoria alta para la cual el



forzamiento radiativo alcanza valores $>8,5 \text{ W/m}^2$ en 2100 y sigue aumentando durante un lapso de tiempo (IPCC 2015).

Modelos Climáticos

Modelo es el conjunto de ecuaciones básicas que representan matemáticamente el comportamiento de la atmósfera, si se utiliza para representar todo el planeta, es un modelo global y si se usa para simular los patrones generales de las variables atmosféricas en el tiempo y su respuesta a los cambios se dice que es un modelo climático (Díaz et al. 2017). Las instituciones de investigación que desarrollan estos modelos los han forzado con incrementos de las concentraciones de CO_2 según los escenarios de emisión del IPCC (Oviedo 2010). La eficiencia de los modelos depende de varios factores como: las condiciones iniciales y condiciones de superficie (en calidad y cantidad), tipos de parametrizaciones de los procesos de superficie, radiación y la convección, la resolución del modelo, el tipo de método numérico usado, etc.

Los **GCM** se basan en ecuaciones sobre una esfera rotatoria utilizando términos termodinámicos para las diversas fuentes de energía (Chacón y Vincenti 2011). Representan la dinámica atmosférica y por tanto de la circulación general alrededor del planeta. Actualmente los modelos de circulación general acoplados Océano-Atmósfera (MCGAAO) ofrecen la más completa representación del sistema climático. Con una resolución aproximada de $2,5^\circ$ (aprox. 278Km) y entre 10 a 20 capas verticales para la atmósfera 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 momentum.
- 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).

Los modelos **RCM** representan fenómenos que se dan a escalas menores que los globales, utilizan los datos de frontera y condiciones iniciales de los GCM y realizan un proceso de reducción de escala considerando los detalles de la zona en la cual se aplica, pero requieren grandes capacidades computacionales y mucho tiempo de ejecución por sus finas resoluciones (Fernández et al. 2012), su mayor limitación es su estacionalidad (Mackinnon y Puterman 1989). Estos reproducen aceptablemente los patrones de precipitación estacionales aunque presentan errores significativos en determinadas regiones y estaciones del año GCM (Castro 2009).

Métodos de Downscaling

El método de regionalización o downscaling es la técnica que hace posible incrementar la resolución de las variables climáticas. Mediante RCM y otras técnicas permiten simular procesos atmosféricos y reducir la escala de los GCM en zonas específicas de estudio. Existen dos métodos de reducción de escala que son: los dinámicos y los estadísticos (Fowler, Blenkinsop y Tebaldi 2007).

El método de **reducción de escala dinámica** se basa en modelos de área limitada (LAM) que utilizan las salidas globales como condiciones iniciales y de contorno, generando información del clima con alta resolución espacial y temporal al resolver ecuaciones diferenciales que representan procesos físicos (Ochoa-Sánchez, 2013). Incluye realimentaciones entre componentes del sistema climático, gran número de variables, físicamente consistentes entre sí y capacidad para generar nuevos extremos climáticos. Los inconvenientes que presenta son que tiene un gran coste computacional y los valores en celdillas representativos son los promedios sobre el área de cada celdilla y no de valores puntuales (Gaertner, Gutiérrez y Castro 2011).

El método de **reducción de escala estadística** se basa en modelos empíricos, que relacionan las ocurrencias locales (predictivos) con las salidas globales

(predictores). Utilizan parámetros para ajustar a partir de las observaciones diarias de calidad para un periodo climático representativo y los datos de un modelo de re-análisis (Ochoa-Sánchez, 2013) con bajo coste computacional y la aplicación rápida a muchos escenarios y modelos globales distintos. Además de información con resolución espacial muy alta, en localidades puntuales. Pero supone que las relaciones empíricas deducidas en clima actual son también válidas en clima futuro y proporciona resultados sólo para las variables para las que se dispone de observaciones (Gaertner, Gutiérrez y Castro 2011).

1.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS TRES MODELOS DEL CMIP5 UTILIZADOS.

En septiembre de 2008, en una reunión de 20 grupos gubernamentales del CMIP5 para la creación de modelos climáticos del mundo, se acordó promover un nuevo conjunto de experimentos coordinados de modelos climático, que comprenden la quinta fase del “Proyecto de Intercomparación de Modelo Acoplado” (CMIP5). Incluyen dos tipos de experimentos de modelado del cambio climático (Taylor, Stouffer y Meehl 2012):

- Integraciones a largo plazo (siglos) suelen iniciarse a partir del control preindustrial multicéntrico.
- Integraciones a corto plazo (10-30 años), o experimentos de predicción decadal, se inician con las condiciones observadas de los océanos y del hielo marino. Estos modelos se denominan modelos de sistemas terrestres (ESM), y tienen la capacidad de utilizar emisiones de gases constituyentes que evolucionan en el tiempo a partir de las cuales las concentraciones pueden ser computadas interactivamente (Knutti y Sedláček 2013).

TABLA 2: Modelos de Clima del CMIP5 utilizados.

MODELO	INSTITUCIÓN	RESOLUCIÓN ATMÓSFERA
CSIRO-MK3-6-0	CSIRO-QCCCE – Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization	1,875° x 1,8653° x L18
GISS-E2-R	NASA-GISS – NASA Goddard Institute for Space Studies	2,5° x 2° x L40



IPSL-CM5A-MR	Institut Pierre-Simon Laplace	2,5° x 2,5352° x L39
---------------------	-------------------------------	----------------------

De 43 modelos del CMPI5 se evaluó la precipitación a nivel nacional en forma general en la TCN y se determinó que los modelos CSIRO-MK3-6-0, GISS-E2-R, IPSL-CM5A-MR y MIROC-ESM tienen la mejor representación. La tabla superior presenta las características de los modelos utilizados en este estudio.

Modelo CSIRO-MK3-6-0

El modelo de clima global CSIRO Mark 3.6 (Mk3.6) (GCM) se desarrolló a partir de la versión Mk3.5. que incluye un tratamiento interactivo en aerosol y un esquema de radiación actualizado. La institución responsable es “CSIRO-QCCCE” (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization en colaboración con Queensland Climate Change Centre of Excellence). Es un modelo acoplado atmósfera-océano con hielo marino dinámico. También tiene un esquema de suelo-copa con propiedades de vegetación prescritas. El componente atmosférico tiene dieciocho niveles verticales y una resolución horizontal de aproximadamente 1,875° x 1,8653° x T63 espectral. Cada cuadrícula atmosférica está acoplada a dos cuadrículas oceánicas: se implementó una mayor resolución norte-sur en el modelo oceánico con el objetivo de mejorar la representación de la variabilidad tropical. El modelo del océano tiene así una resolución de aproximadamente 1,875° x 0,9375° y tiene 31 niveles verticales (Jeffrey et al. 2013).

Modelo GISS-E2-R

Las configuraciones del GISS varían en función del grado de interactividad en la composición atmosférica, el ciclo del carbono, el modelado oceánico y la rejilla atmosférica. Creado por la “NASA-GISS – NASA” (Goddard Institute for Space Studies). Para el GISS-E2-R la resolución es de 2,5° x 2° x L40. Y se acopla al modelo del océano de 1° x 1,25° x L32. Hay tres versiones que varían en cómo se manejan los aerosoles y la química atmosférica (Dr. Gavin Schmidt 2016):

- NINT los aerosoles y el ozono se leen a través de campos transitorios de aerosol y ozono pre-calculados.



- TCAD los aerosoles y la química atmosférica se calculan en línea en función del estado atmosférico y de los inventarios de emisiones.
- TCADI la composición atmosférica se calcula como para TCAD, añadiendo el cálculo de los impactos de aerosol sobre las nubes.

Modelo IPSL-CM5A-MR

IPSL-CM5A-MR del “IPSL” (Institut Pierre-Simon Laplace) es la versión de resolución media del modelo de sistema de tierra IPSL-CM5A. La resolución es de $2,5^{\circ} \times 2,5352^{\circ}$ con 39 niveles verticales para la atmósfera, con una resolución incremental meridional de $0,5^{\circ}$ cerca del Ecuador y con 31 niveles verticales para el océano (149x182L31). En comparación con IPSL CM4, IPSL-CM5A incluye entre otras las siguientes mejoras: un aumento de la resolución vertical de la atmósfera a 39 niveles verticales, con 15 niveles por encima de 20 km; seis especies diferentes de aerosoles que pueden ser el ozono estratosférico y troposférico, prescrito o computado en línea, parametrizaciones físicas mejoradas del océano, modelos de ciclo del carbono tanto para la parte oceánica como para la parte terrestre y el cambio en el uso de la tierra impuesto externamente (Questionnaire 2015).

1.3 MODELO REGIONAL DE CLIMA Weather Research and Forecasting (WRF)

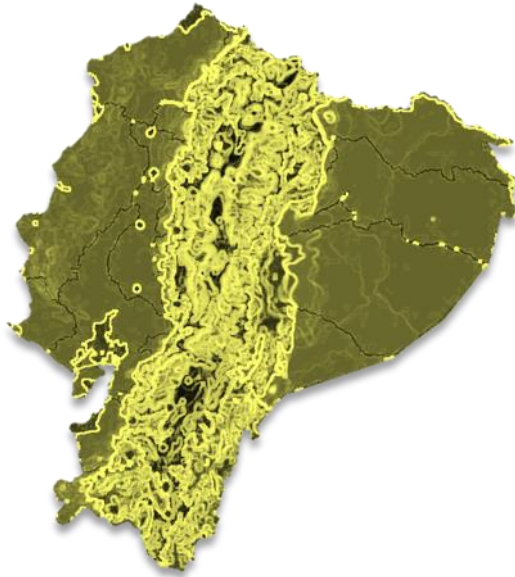
El modelo meteorológico “WRF” (Weather Research and Forecasting) es un modelo de última generación, que se ha convertido en el más utilizado en el mundo durante los últimos años para el pronóstico de campos de variables meteorológicas (componentes de velocidad del viento, la temperatura, humedad relativa y la altura geopotencial en los niveles de presión) a escala regional. Las características principales son su dinámica no hidrostática y su capacidad de permitir el uso de resoluciones espaciales de unos pocos kilómetros. 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). Se desarrolló en 1990 por parte del “Centro Nacional de Investigación Atmosférica” (NCAR), la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica, la “Agencia de Tiempo de la Fuerza Aérea” de Estados Unidos (AFWA), el Laboratorio de Investigación Naval, la Universidad de Oklahoma y la “Administración Federal de Aviación” de Estados Unidos (FAA) (Moya y Ortega 2015). También necesita información sobre la topografía, humedad, temperatura y uso del suelo. Las condiciones iniciales y de frontera son tomadas del “Climate Forecast System Reanalysis” (CFSR). Las principales variables de salida son las componentes del viento, la velocidad vertical, la perturbación en la temperatura potencial, la perturbación en la altura geopotencial y la perturbación en la presión de aire seco en superficie. WRF usa las ecuaciones de Euler que se obtienen al despreciar los términos disipativos en las ecuaciones de Navier-Stokes. El método numérico que utiliza WRF para solucionar el conjunto de ecuaciones es el de Runge-Kutta de segundo y tercer orden. (Díaz et al. 2017).

CAPÍTULO 2

DATOS Y ÁREA DE ESTUDIO



2. DATOS Y ÁREA DE ESTUDIO

2.1 REGIÓN DE ESTUDIO

La evaluación de la precipitación de los tres GCM y tres W-RCM se realizó en el territorio ecuatoriano exceptuando las islas Galápagos. El Ecuador está ubicado en la costa noroccidental de América del Sur. Limita al norte con Colombia, al sur y al este con Perú y al oeste con el océano Pacífico. Éste se encuentra sobre la línea ecuatorial terrestre por lo cual su territorio está en ambos hemisferios (Wikipedia 2017). Cubre un área de 283.561 Km² de tierra incluyendo las islas Galápagos (De Frias 2015) y con una población mayor a 16,6 millones de habitantes (INEC,2017).

Geografía

La formidable barrera NNE-SSO de la cordillera de los Andes desempeña un papel fundamental en la formación, el desplazamiento y el aislamiento de las masas de aire local o regional. Su altura, que alcanza hasta más de 6.000 m.s.n.m., produce masas de aire frío, modifica el régimen de precipitaciones. delimita las hoyas más secas haciendo de pantalla ante la entrada de aire húmedo, y finalmente, impide todo contacto entre las masas de aire provenientes del Pacífico y aquellas procedentes de la región amazónica (Pouyaud 1995). El Ecuador continental está dividido de Oeste a Este en tres grandes regiones naturales como se puede ver en la Figura 2.

Región Costa: Se extiende desde las estribaciones de la cordillera Occidental hasta el mar, es una planicie aluvial baja. Tiene una longitud de 800km y anchura entre 50 y 150 km. Se pueden distinguir dos unidades (Santiago 2007):

1. En la parte occidental y noroccidental se extiende una cordillera costanera cuya altura máxima no supera los 800 m.s.n.m. y que, a nivel de Puerto Cayo, curva hacia el Este en dirección a Guayaquil en donde desaparece.

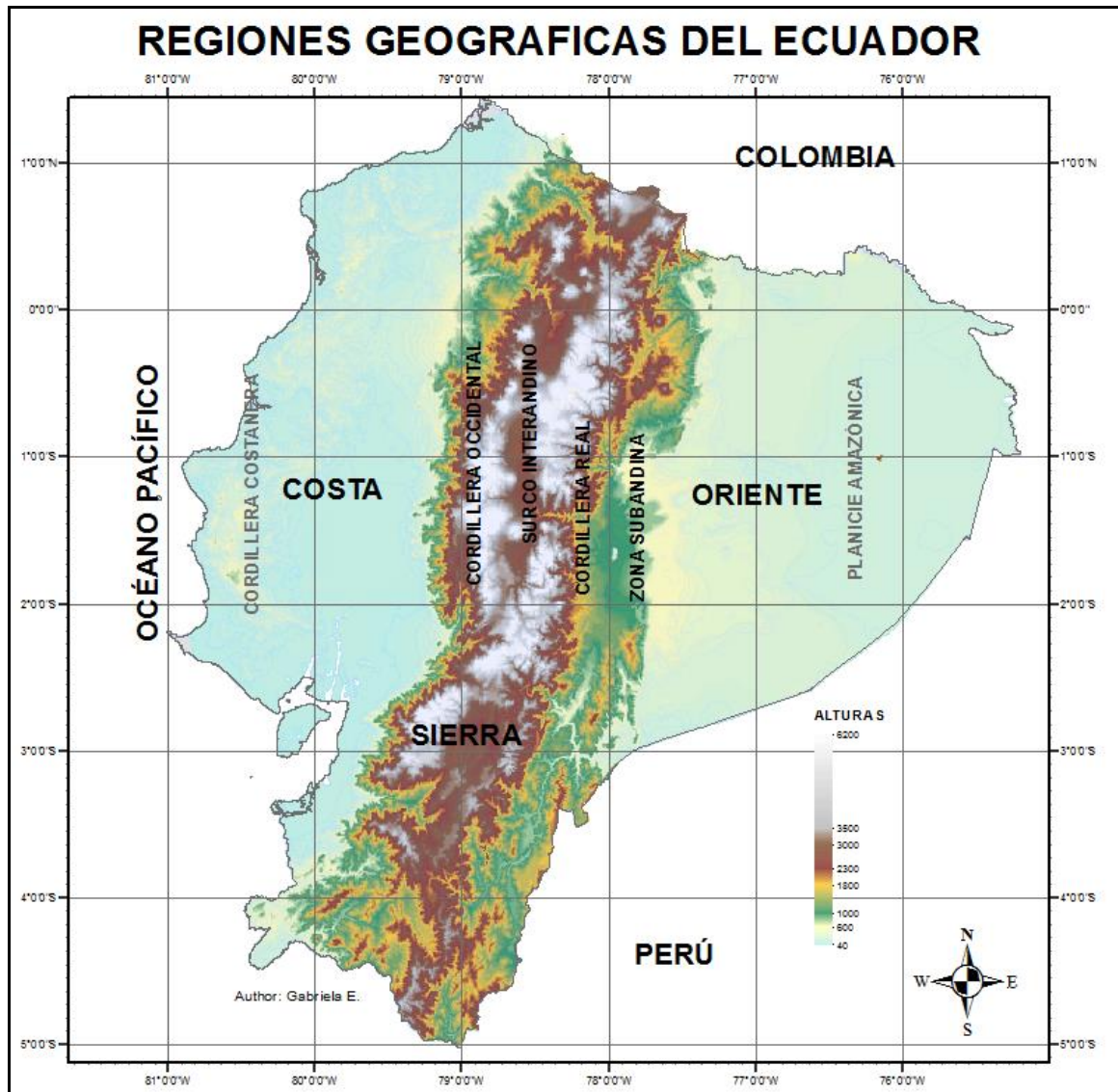


FIGURA 2: Regiones Geográficas del Ecuador Continental.

Fuente: Elaboración Propia.

2. Al pie de los Andes se sitúa la fosa de hundimiento del Guayas, cuyo ancho es de alrededor de 80 Km; está limitada al Norte por relieves levantados y se prolonga hacia el Sur, hasta el Perú, mediante una estrecha franja litoral.

Región Sierra: De Norte a Sur se extiende la cordillera de los Andes, cuyo ancho varía entre 100 y 140 Km, presenta vertientes externas muy abruptas. Comprende tres unidades: la cordillera Occidental, la cordillera Oriental y la depresión Central o surco interandino. Es la zona del país con mayor altitud, de 3.500 a 4.000 metros. Algunos picos se elevan por encima de los 6.000 m. La mayor parte de las cimas tienen nieves perpetuas y glaciares. Posee varios



volcanes activos, la mayoría en el norte. El callejón interandino está constituido por relieves transversales conocidos como nudos (Santiago 2007).

Región Amazónica: está formada de dos partes muy distintas (Pouyaud et al. 1995):

- La zona sub-andina, paralela a los Andes, está constituida por una cordillera de alrededor de 50 Km de ancho. De una altura comprendida entre 500 y 3.900 m.s.n.m. (Sumaco, Cutucú y Cóndor), está dividida en la zona central por el relieve tabular profundamente erosionado constituido por el importante cono de deyección del Pastaza.
- Hacia el Este, a una altura inferior a los 350 m.s.n.m., se extienden la vasta llanura amazónica, sus bajas colinas y sus grandes valles a menudo pantanosos.

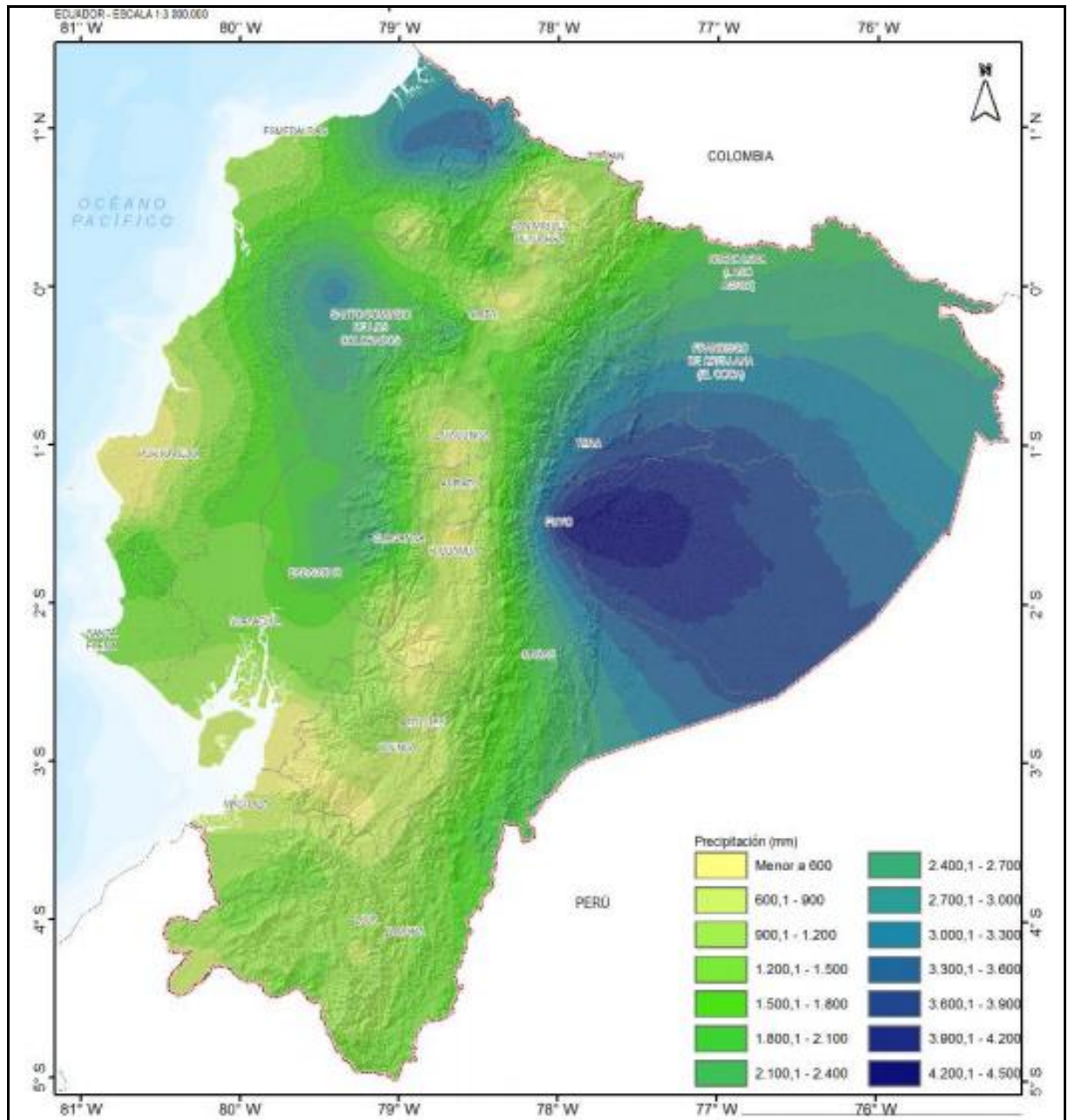
2.2 CLIMATOLOGÍA DEL ECUADOR

El Ecuador está regido por las influencias climáticas propias de las zonas de baja latitud y sometidas a la influencia de corrientes oceánicas, se suma el efecto de la cordillera andina que desempeña un papel preponderante en la génesis, el aislamiento y la repartición de masas de aire cuyas características influyen en la formación de las precipitaciones, que individualizan tres grandes regiones naturales como son la región litoral, andina y amazónica (Pouyaud et al. 1995). La gama de alturas anuales de lluvia es extensa desde menos de 600mm³ hasta más de 4000mm³ como se puede observar en la Figura 3.

En la región litoral y el frente occidental de la cordillera de los Andes existe un régimen de precipitación tipo tropical con una estación seca y una sola estación lluviosa entre diciembre y febrero, en correspondencia con el calentamiento estacional del océano circundante a la Costa y a la migración sur de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT).

En las estribaciones orientales de la cordillera Real y en la Amazonia existe un régimen persistente con lluvias abundantes bien distribuidas a lo largo de todo

el año gobernando por una compleja circulación de masas de aire estacionales que discurren desde los principales centros de alta y baja presión ubicados entre Bolivia y Brasil.



En el callejón interandino existe un régimen tipo ecuatorial con dos estaciones lluviosas en octubre-noviembre y enero-mayo que experimenta una influencia variante de las masas de aire oceánico y continental. La existencia de relieves transversales definen cuencas más abrigadas y por lo tanto más secas dado que las masas de aire pierden mucha de su humedad en ambas estribaciones,

dada la presencia de glaciares y nieves perpetuas en la cima de algunos volcanes, los ríos alimentados por aguas fundidas constituyen un caso particular (Cedeño y Donoso 2010). Ejemplos de estos regímenes se revelan en la figura 4.

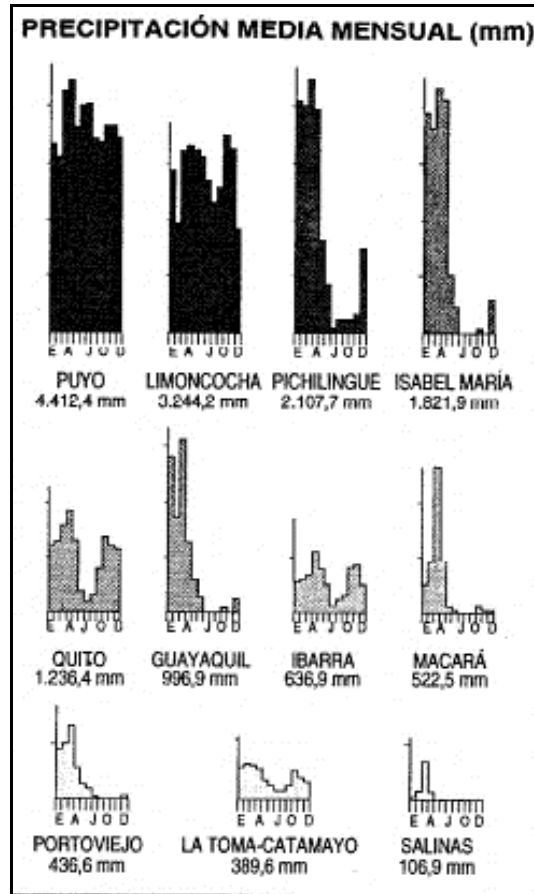


FIGURA 4: Regímenes de lluvia y pluviometría del Ecuador periodo 1965-1978.

Fuente: Pouyaud et al. 1995

Zonas Climáticas del Ecuador Continental

Región costera: 3 tipos

- *Tropical mega térmico árido a semiárido* en la península de Santa Elena y el cabo San Lorenzo y la franja litoral meridional con temperaturas anuales de 24°. Precipitaciones inferiores a 500 mm³ y en una sola estación lluviosa de enero a abril. Por la corriente de Humboldt que va de sur a norte y los vientos alisios que soplan desde el este al oeste, al cambiar su dirección traen como su principal consecuencia el fenómeno del niño.



- *Clima tropical mega térmico seco a semi húmedo* está situado al Este del clima anterior y su influencia se extiende en una franja de alrededor de 60 Km de ancho. El total pluviométrico anual está comprendido entre 500 mm³ y 1.000 mm³ recogidos de diciembre a mayo. La estación seca es muy marcada y las temperaturas medias elevadas, superiores a 24°C.
- *Clima tropical mega térmico húmedo*, presente en una franja cuyo ancho máximo es ligeramente inferior a 110 Km, se inicia cerca de Esmeraldas para desaparecer a nivel del golfo de Guayaquil. La lluvia total anual varía generalmente entre 1.000 mm³ y 2.000 mm³, las lluvias se concentran en un periodo único, de diciembre a mayo, siendo de clima seco el resto del año. Las temperaturas medias fluctúan alrededor de los 24°C.

Región andina: 4 tipos

- *Clima tropical mega térmico muy húmedo* es un clima de transición entre los de la región andina y los de las zonas litoral y amazónica. Está presente en las vertientes exteriores de las dos cordilleras, entre los 500 y los 1.500 m.s.n.m. Como las vertientes reciben el impacto directo de las masas de aire tropical cargado de humedad, las precipitaciones anuales son superiores a 2.000 mm³; caen durante una sola estación lluviosa. La vegetación es esencialmente selvática.
- *Clima ecuatorial meso térmico semi-húmedo a húmedo* es el clima más característico de la zona interandina pues, salvo en los valles abrigados y las zonas situadas por encima de los 3.200 m.s.n.m., ocupa la mayor extensión. Las temperaturas medias anuales están comprendidas generalmente entre 12°C y 20°C. Las precipitaciones anuales fluctúan entre 500 mm³ y 2.000 mm³ y están repartidas en dos estaciones lluviosas, de febrero-mayo y octubre-noviembre. La estación seca principal, de junio a septiembre, es generalmente muy marcada. La vegetación natural de esta zona ha sido ampliamente sustituida por pastizales y cultivos.

- *Clima ecuatorial meso térmico seco* está asociado a los valles interandinos abrigados y de menor altura. Las temperaturas medias anuales fluctúan entre 12°C y 20°C con muy poca diferencia entre los meses de verano e invierno. Las lluvias anuales son inferiores a 500 mm³ presentan dos picos pluviométricos separados por dos estaciones secas.

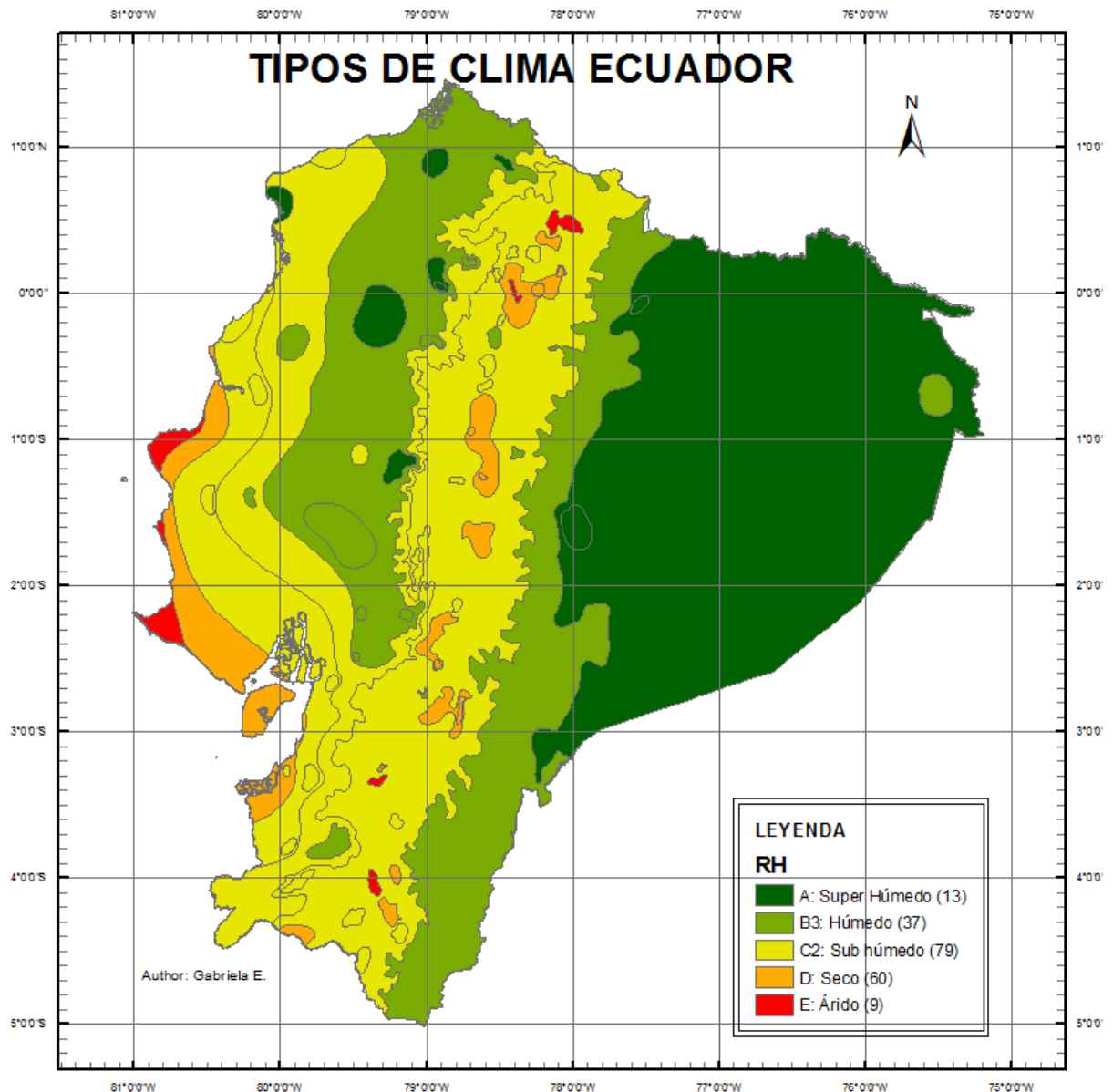


FIGURA 5: Zonas climáticas del Ecuador.

Fuente: INAMHI

- *Clima ecuatorial frío de alta montaña* se sitúa siempre por encima de los 3.000 m.s.n.m. La altura y la exposición son los factores que condicionan los valores de las temperaturas y las lluvias. Las



temperaturas medias anuales, fluctúan casi siempre entre 4° y 8°C. La gama de los totales pluviométricos anuales va de 800 mm³ a 2.000 mm³ y la mayoría de los aguaceros son de larga duración, pero de baja intensidad. La vegetación natural, llamada «matorral» en el piso más bajo, es reemplazada en el piso inmediatamente superior por un espeso tapiz herbáceo frecuentemente saturado de agua, del páramo.

Región amazónica:

3. *clima mega térmico muy húmedo* se caracteriza por una temperatura media elevada, cercana a los 25°C, y por totales pluviométricos muy importantes, casi siempre superiores a 3.000 mm³, que localmente pueden superar los 6.000 mm³. A pesar de la existencia de un máximo lluvioso en julio-agosto y de una baja relativa entre diciembre y febrero, la distribución de las lluvias es notablemente regular a todo lo largo del año.

2.3 DATOS

Se trabajará con series temporales mensuales de 60 estaciones pluviométricas, en un periodo de 25 años de enero de 1981 a diciembre de 2005.

Datos de las observaciones

Los datos de las 137 estaciones meteorológicas para la evaluación de los seis modelos de precipitaciones del Ecuador continental han sido facilitados por el INAMHI. Estos datos de precipitación disponen de series de tiempo mensuales que **inician desde enero de 1981 hasta diciembre de 2010**. Esta información se ha depurado para disponer de series continuas. La tabla 3 muestra la lista de estaciones utilizadas y en la figura 5 ilustra su ubicación en el mapa del Ecuador.



TABLA 3: Estaciones utilizadas en la evaluación de los modelos climáticos.

N°	CÓDIGO	ESTACIÓN	CORDENADAS UTM WGS84		ALTURA	N°	CÓDIGO	ESTACIÓN	CORDENADAS UTM WGS84		ALTURA
			UTM-X	UTM-Y					UTM-X	UTM-Y	
1	M0001	INGUINCHO	789081	10028216	3140	31	M0326	SELVA ALEGRE-IMBABURA	789081	10028216	3140
2	M0002	LA TOLA	789081	10028216	3140	32	M0335	LA CHORRERA	789081	10028216	3140
3	M0004	RUMIPAMBA-SALCEDO	789081	10028216	3140	33	M0346	YARUQUI INAMHI	789081	10028216	3140
4	M0006	PICHILINGUE	789081	10028216	3140	34	M0357	CANAL 10 TV.	789081	10028216	3140
5	M0007	NUEVO ROCAFUERTE	789081	10028216	3140	35	M0361	NONO	789081	10028216	3140
6	M0008	PUYO	789081	10028216	3140	36	M0362	LAS PAMPAS	789081	10028216	3140
7	M0024	QUITO INAMHI-INNAQUITO	789081	10028216	3140	37	M0363	SIGCHOS	789081	10028216	3140
8	M0025	LA CONCORDIA	789081	10028216	3140	38	M0364	LORETO PEDREGAL	789081	10028216	3140
9	M0026	PUERTO ILA	789081	10028216	3140	39	M0369	CUSUBAMBA	789081	10028216	3140
10	M0031	CAÑAR	789081	10028216	3140	40	M0376	PILAHUIN	789081	10028216	3140
11	M0033	LA ARGELIA-LOJA	789081	10028216	3140	41	M0377	TISALEO	789081	10028216	3140
12	M0041	SANGAY (P. SANTA ANA)	789081	10028216	3140	42	M0380	HUAMBALÓ	789081	10028216	3140
13	M0051	BABAHOYO-UTB	789081	10028216	3140	43	M0393	SAN JUAN-CHIMBORAZO	789081	10028216	3140
14	M0105	OTAVALO	789081	10028216	3140	44	M0408	GUANO	789081	10028216	3140
15	M0123	EL CORAZÓN	789081	10028216	3140	45	M0414	CHANIN	789081	10028216	3140
16	M0128	PEDRO FERMÍN CEVALLOS(COLEGIO)	789081	10028216	3140	46	M0417	PISCICOLA CHIRIMICHAY	789081	10028216	3140
17	M0130	CHILLANES	789081	10028216	3140	47	M0418	CUMBE	789081	10028216	3140
18	M0139	GUALACEO	789081	10028216	3140	48	M0419	GIRÓN	789081	10028216	3140
19	M0141	EL LABRADO	789081	10028216	3140	49	M0424	SIGSIG INAMHI	789081	10028216	3140
20	M0142	SARAGURO	789081	10028216	3140	50	M0426	RICAUARTE-CUENCA	789081	10028216	3140
21	M0147	YANGANA	789081	10028216	3140	51	M0427	SAYAUSÍ (MATADERO DJ.)	789081	10028216	3140
22	M0180	ZARUMA	789081	10028216	3140	52	M0429	SURUCUCHO(LLULLUCHIS)	789081	10028216	3140
23	M0189	GUALAQUIZA INAMHI	789081	10028216	3140	53	M0432	SAN LUCAS INAMHI	789081	10028216	3140
24	M0301	FF CC CARCHI	789081	10028216	3140	54	M0434	SOZORANGA INAMHI	789081	10028216	3140
25	M0308	TUFINNO	789081	10028216	3140	55	M0453	CHORRILLOS	789081	10028216	3140
26	M0312	PABLO ARENAS	789081	10028216	3140	56	M0457	PUERTO CAYO	789081	10028216	3140
27	M0314	AMBUQUI	789081	10028216	3140	57	M0481	USHCURRUMI	789081	10028216	3140
28	M0315	PIMAMPIRO	789081	10028216	3140	58	M0497	LOGRONNO	789081	10028216	3140
29	M0324	SAN FRANCISCO DE SIGSIPAMBA	789081	10028216	3140	59	M0502	EL PANGUI	789081	10028216	3140
30	M0325	GARCÍA MORENO	789081	10028216	3140	60	M0543	CAJANUMA	789081	10028216	3140

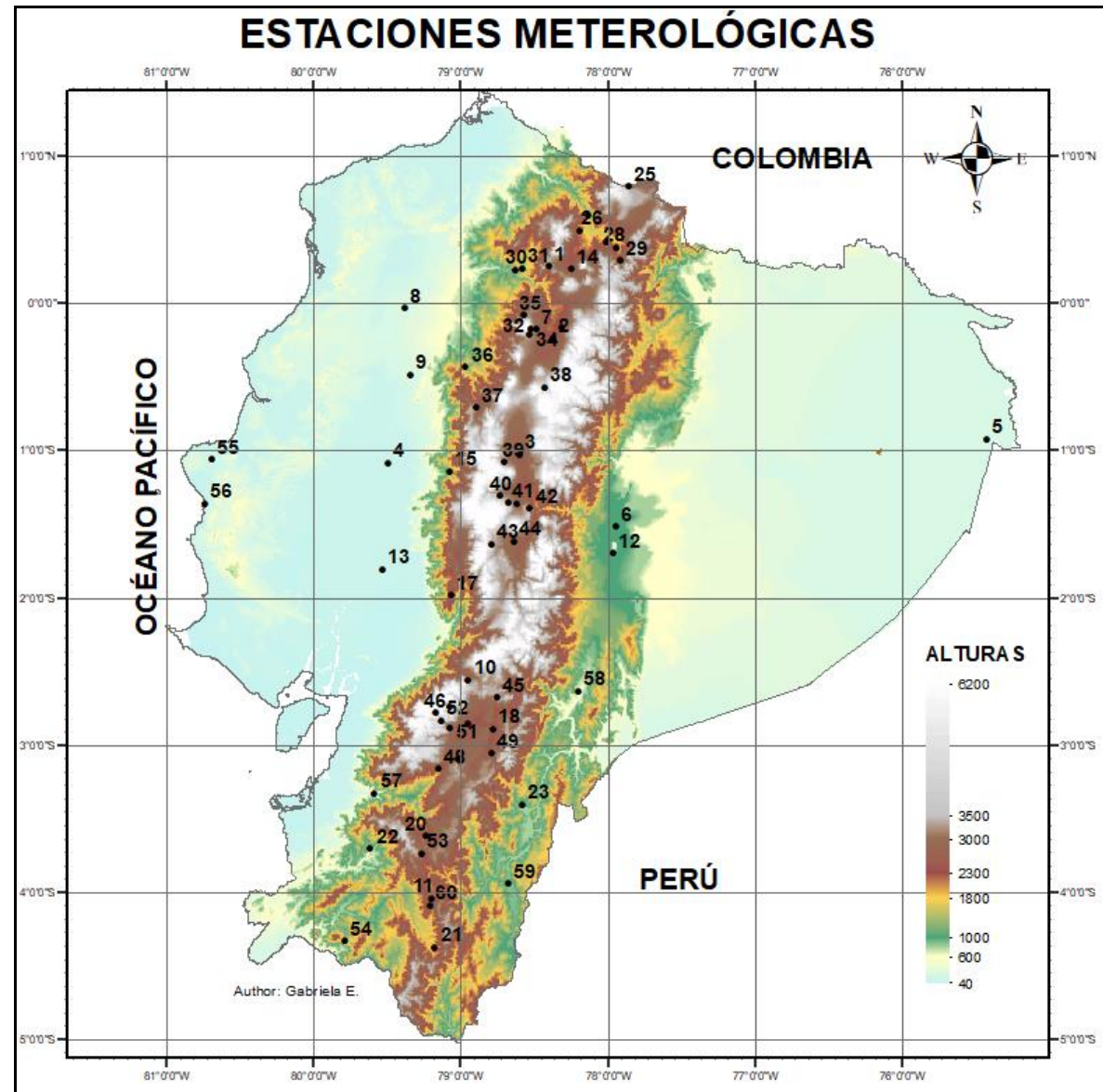


FIGURA 6: Mapa de estaciones meteorológicas del Ecuador utilizadas para la evaluación de los modelos climáticos.

Datos de los modelos globales de clima

Se utilizaron los GCM correspondientes a tres de cuatro modelos globales utilizados en la Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático (TCN), del informe del panel intergubernamental del cambio climático (IPCC), facilitados por el Ministerio de Medioambiente de Ecuador (MAE). Estos son; CSIRO-Mk3, GISS-E2-R, IPSL-CM5A-MR. **Del periodo histórico de 1961 al 2005**, las series de tiempo son mensuales, la figura inferior compara la resolución de cada modelo global.

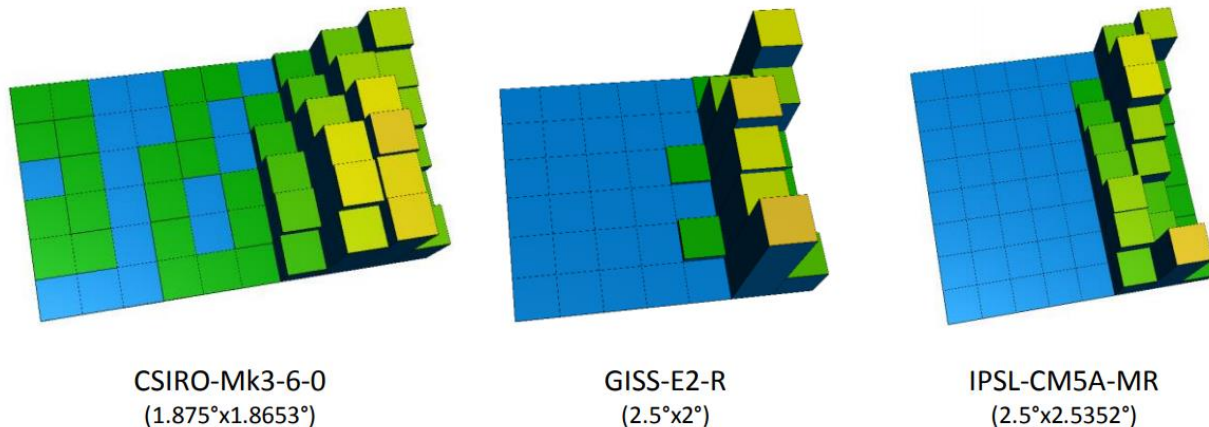


FIGURA 7: Representación espacial del Ecuador de tres de modelos globales del CMIP5 utilizados en la TCN.

Fuente: (Armenta, Villa y Jácome 2016)

Datos de los modelos regionales de clima

Los datos de reducción de escala dinámica obtenidos del WRF de los modelos CSIRO-Mk3, GISS-E2-R, IPSL-CM5A-MR del periodo de 1981 a 2005 de series mensuales con una resolución espacial de 10 km (fig.8) y resolución temporal diaria y cada 6 horas. Compartidos igualmente por el proyecto MAE-TCN. Se realizó utilizando el modelo WRF versión 3.6.1 en modo climático. Las condiciones iniciales y de frontera se tienen de los datos de los modelos del CMIP5, la lista de variables utilizadas como entradas son: 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 dominios utilizados (fig.9) son tres: 1 a 90km, 2 a 30km y 3-4 a 10km, con el siguiente esquema de parametrización:

Microfísica: WSM 3-class simple ice (momento único de clase 3). Incluye sedimentación del hielo y otras nuevas parametrizaciones de la fase de hielo. Los



procesos de congelación/fusión se calculan durante los pasos intermedios de caída para aumentar la precisión en el perfil de calentamiento vertical.

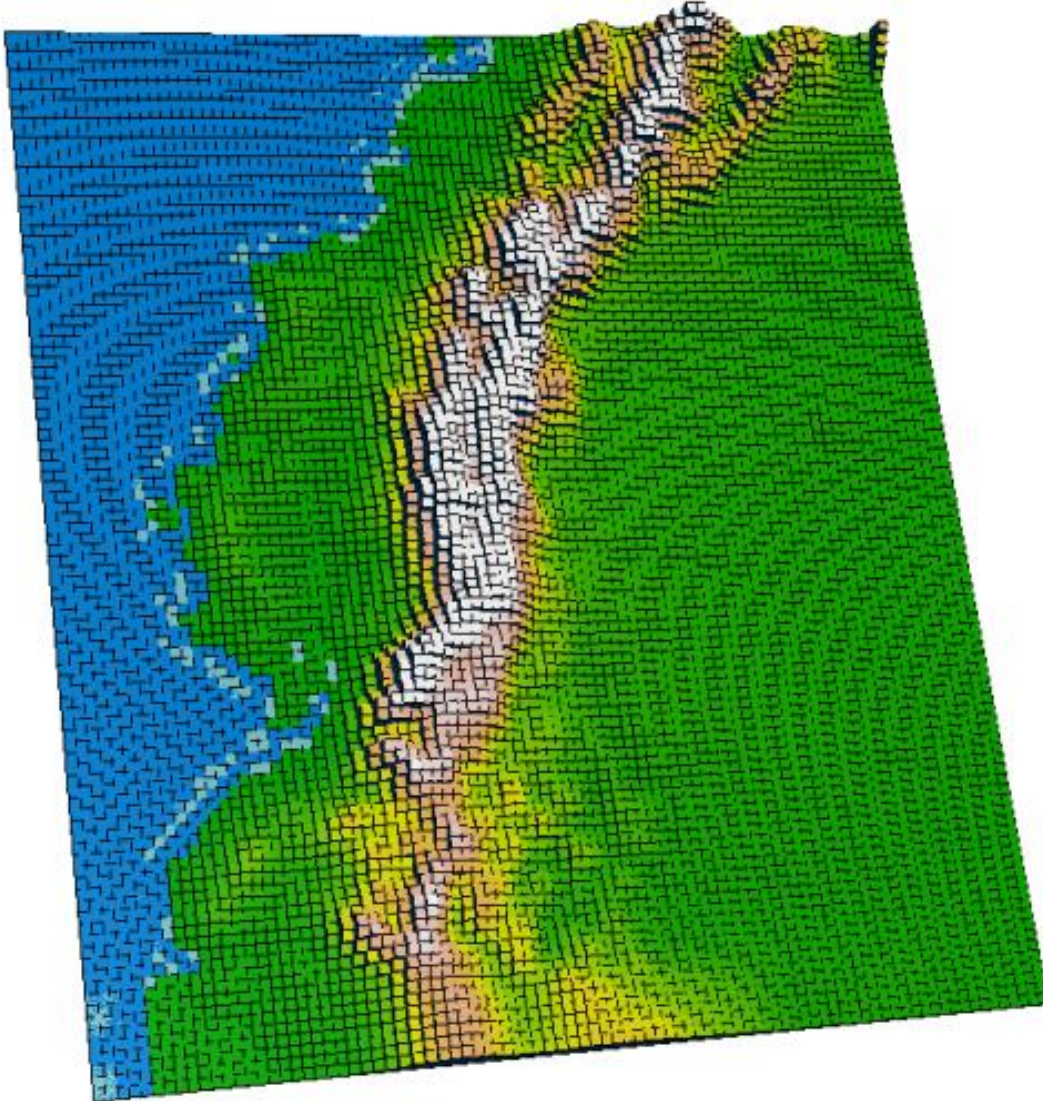


FIGURA 8: Representación de la topografía del WRF a 10km.
Fuente:(Armenta, Villa y Jácome 2016)

Radiación Onda Larga: RRTM (Modo de transferencia radiativa). Utiliza valores predeterminados en tablas que representan los procesos de onda larga debidos al



vapor de agua, ozono, CO₂ y gases traza considerando también las propiedades ópticas de la nube en función de su profundidad.

Radiación Onda Corta: Dudhia. Representa el flujo de energía solar que llega a la atmósfera considerando la absorción del vapor de agua y la absorción y albedo de las nubes.

Capa superficial: Monin-Obukhov. La teoría de similaridad establece como resultado una relación implícita entre la velocidad de fricción, longitud de Obujhov, temperatura de escala y humedad específica de escala.

Superficie: Unified Noah land-surface model. Es un modelo de humedad y temperatura del suelo de 4 capas con predicción de la capa de nieve. Incluye la evapotranspiración, el drenaje y la escorrentía, teniendo en cuenta las categorías de vegetación, la fracción de vegetación mensual y la textura del suelo.

Capa límite: YSU (Yonsei University). Representa los flujos verticales pequeños que son resultado del transporte turbulento en toda la columna atmosférica.

Cúmulus: Kain-Fritsch (new Eta). Considera las corrientes verticales de aire húmedo en ambos sentidos, además de considerar un modelo simple de microfísica.



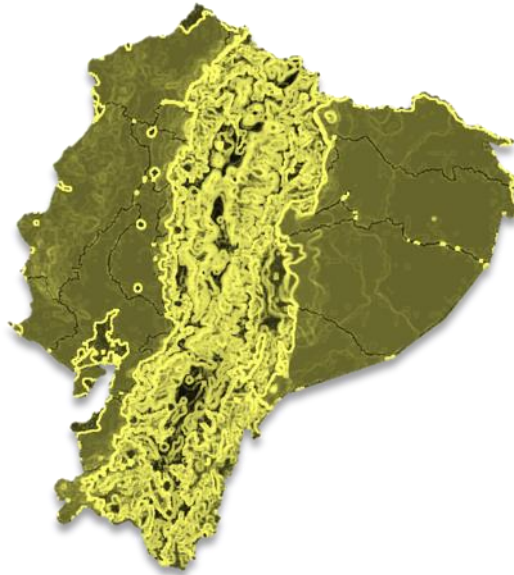
FIGURA 9: Dominios simulados con WRF.

Fuente: Armenta, G.



CAPÍTULO 3

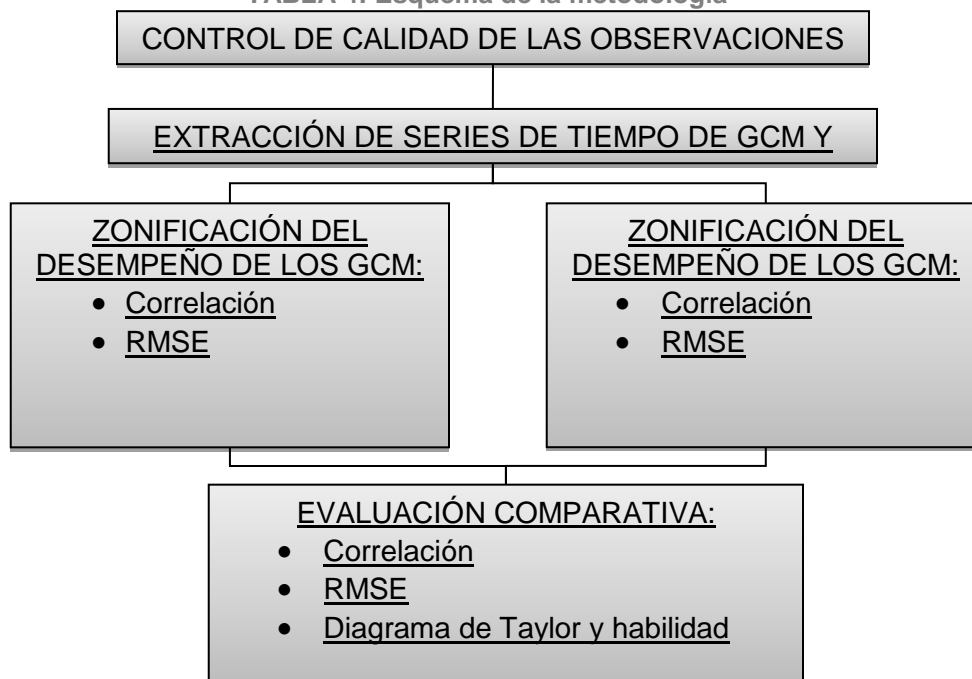
MÉTODOS



3. MÉTODOS

En general la metodología empieza por el control de calidad de las observaciones y la extracción de series de tiempo de los GCM y WRF sobre las estaciones para su evaluación, para posteriores análisis orientados a los objetivos presentados anteriormente. A continuación, se muestra en forma esquemática la metodología por objetivos. En las secciones 4.1 y 4.2 se zonifica el desempeño de los modelos globales llamados para este caso M-GCM, y los W-RCM respectivamente a través de la evaluación de la correlación y el RMSE. En la sección 4.3 se hace una evaluación comparativa entre los M-GCM y W-RCM comparando la correlación, RMSE, el diagrama de Taylor y su eficiencia.

TABLA 4: Esquema de la metodología





3.1 CONTROL DE CALIDAD DE LAS OBSERVACIONES Y EXTRACCIÓN DE SERIES DE PRECIPITACIÓN DE LOS MODELOS GLOBALES Y REGIONALES.

3.1.1 Control de calidad de las observaciones.

Para el control de calidad de los datos observados se utilizó criterios de control recomendados. El primer criterio utilizado fue el porcentaje de vacíos menor al 10%, con el que redujimos el número de estaciones de 137 a 81 estaciones (Campozano et al. 2015). El segundo criterio fue el de valores atípicos que para una distribución arbitraria cumplan el rango:

$$Q_1 - 3(Q_3 - Q_1) \leq x \leq Q_3 + 3(Q_3 - Q_1) \text{ (ec. 1).}$$

Donde:

Q_1 = primer cuartil o 25 percentil,

Q_3 = tercer cuartil o 75 percentil.

Luego se evaluó la homogeneidad considerando que las series de tiempo climático homogéneo tengan variaciones en los datos causadas únicamente por variaciones en el clima, más no a causa de otros factores extremos. La homogeneidad se comprobó mediante el paquete de software RHTestsV4 con los datos mensuales, descartando las estaciones que tengan más de tres puntos de cambio significativos (Wang y Feng 2010). Previo llenado de datos faltantes mediante una combinación de dos métodos, el método autoregresivo como una primera aproximación de rellenado y luego en forma iterativa utilizando la descomposición en componentes principales de la matriz de correlación de datos de una misma variable (Ureña et al. 2016). Así se obtuvieron 60 estaciones con series de tiempo completas y homogéneas de un periodo de 25 años.



En la tabla 3 del capítulo 2 sección 2.3 podemos observar la lista de las 60 estaciones que se utilizaron en los análisis, con su ubicación y además observamos en la figura 6 de la misma sección las estaciones en un modelo digital de elevaciones DEM de ArcGIS. En el anexo 2 podemos observar las gráficas de la homogeneidad.

3.1.2 Extracción de series de tiempo

Se extrajo las series de tiempo de la variable precipitación para las 60 estaciones validadas. Tanto, de los GCM (CSIRO, GISS y ISPL) como de los RCM (CSIRO, GISS y ISPL) mediante un script en R-Studio y que llamaremos M-GCM y W-RCM respectivamente. Las series temporales son mensuales y abarcan un periodo de 25 años de enero de 1981 a diciembre de 2005.

3.2 CRITERIOS PARA LA ZONIFICACION DEL DESEMPEÑO DE LOS M-GCM Y W-RCM

El análisis se realizó mediante las siguientes variables estadísticas:

3.2.1 Coeficiente de Correlación

Para datos muestrales el coeficiente de correlación del producto–momento de Pearson está definido como sigue:

$$R = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} \text{ (ec.2)}$$

Donde:

R = coeficiente de correlación

σ_{xy} = covarianza



$\sigma_x =$ *desviación estandar de las observaciones x*

$\sigma_y =$ *desviación estandar del modelo y*

El coeficiente de correlación se calcula dividiendo la covarianza entre el producto de la desviación estándar observada 'x' por la desviación estándar del modelo 'y'. Si todos los valores del conjunto de datos caen en una línea recta con pendiente positiva, el coeficiente de correlación será 1. Por otra parte, si los puntos del conjunto de datos caen sobre una línea recta con pendiente negativa, el coeficiente de correlación muestral será menos 1 (Anderson et al. 2001). Este coeficiente muestra cómo de estrecha es la relación lineal existente entre los pares de datos formados por el modelo y las determinaciones reales.

Para nuestro estudio, se correlacionaron los datos de los seis modelos (M-CSIRO, M-GISS, M-ISPL, W-CSIRO, W-GISS, W-ISPL) con los datos observados de las 60 estaciones anteriormente validadas en un periodo de 25 años. Datos que se graficaron en ArcGIS para una mejor interpretación.

3.2.2 Raíz del error cuadrático medio (RMSE)

La Raíz del Error Cuadrático Medio o RMSE (Root Mean Squared Error) es una medida de desempeño cuantitativa. En este contexto RMSE consiste en la raíz cuadrada de la sumatoria de los errores cuadráticos. RMSE amplifica y penaliza con mayor fuerza aquellos errores de mayor magnitud. La fórmula de cálculo del RMSE se muestra a continuación (GEO 2015):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (A_t - F_t)^2} \quad (ec. 3)$$

Donde:

$RMSE =$ *raíz del error cuadrático medio*

$A_t =$ *media de la serie tiempo observada*

$F_t = \text{media de la serie de tiempo del modelo}$

Los errores son una medida de cuán lejos están los puntos de datos de la línea de regresión (Andale 2016), para obtener una idea de la media del error detectado para el modelo, en la unidad de medida original, y sin tener en cuenta los efectos del signo del error, lo cual resulta muy útil para comprobar la precisión del modelo.

Para evaluar la dispersión de los datos de los modelos y los observados se calculó la raíz del error cuadrático medio y se mapeó estos resultados en ArcGIS y generando una zonificación de cada modelo.

3.3 CRITERIOS PARA LA EVALUACIÓN COMPARATIVA

3.3.1 Diagrama del Taylor

Una de las herramientas de mayor utilidad para evaluar el rendimiento de un modelo es el conocido como Diagrama de Taylor. Este diagrama utiliza la ley de cosenos (fig. 10) para representar en una sola gráfica cómo varían simultáneamente los tres estadísticos más representativos del rendimiento de un modelo, como son; RMSE, la desviación estándar y el Coeficiente de Correlación de Pearson (Follos 2012).

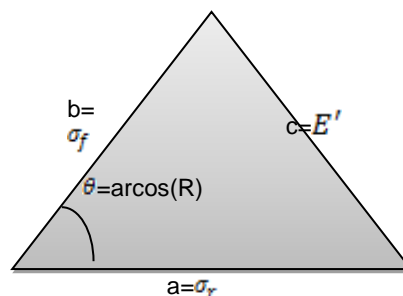


FIGURA 10: Ley de cosenos.



Los diagramas de Taylor proporcionan una manera de resumir gráficamente la proximidad de un patrón con las observaciones (fig. 11). La razón por la que cada punto en el espacio bidimensional del diagrama de Taylor puede representar tres diferentes estadísticas simultáneamente es que estas estadísticas están relacionadas por la siguiente fórmula:

$$E'^2 = \sigma_f^2 + \sigma_r^2 - 2\sigma_f\sigma_r R \text{ (ec. 6)}$$

Donde:

$$E' = RMSE$$

$$\sigma_f = \text{desviación estandar del modelo}$$

$$\sigma_r = \text{desviación estándar de las observaciones}$$

$$R = \text{coeficiente de correlación}$$

La **desviación estándar** (ec. 5) se define como la raíz cuadrada positiva de la varianza, la varianza (ec. 4) es una medida de variabilidad que utiliza todos los datos basada en la diferencia entre el valor de cada observación y la media (Anderson et al. 2001), permite comprobar cuál es la variabilidad existente en ambas muestras de datos, pudiendo ver además si dicha variabilidad se conserva o varía en el modelo respecto a lo observado para los datos reales:

$$\sigma^2 = \frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{N} \text{ (ec. 4)}$$

Donde:

$$\sigma^2 = \text{varianza}$$

$$x_i = \text{observaciones}$$

$$\bar{x} = \text{media de las observaciones}$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} \text{ (ec. 5)}$$

Donde:

$$\sigma = \text{desviación estándar}$$

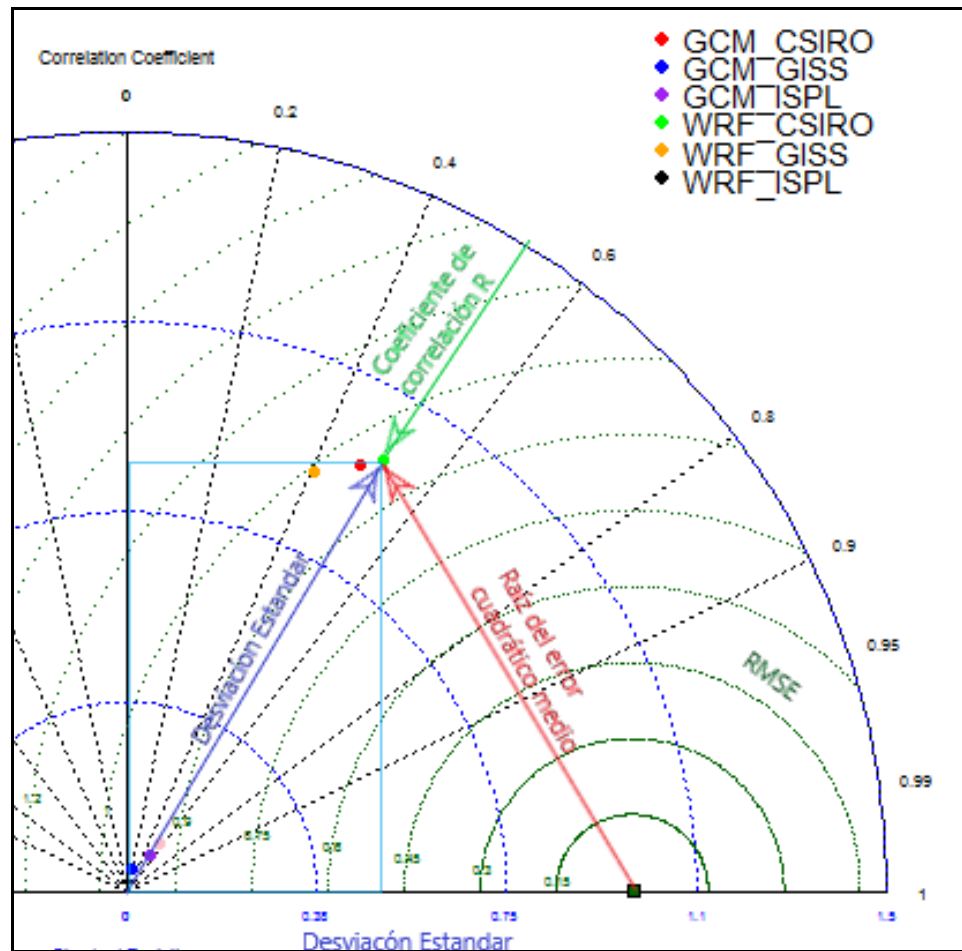


FIGURA 11: Diagrama de Taylor.

Las estadísticas pueden ser normalizadas dividiendo tanto el RMSE y la desviación estándar de los modelos por la desviación estándar de las observaciones. Esto permite trazar estadísticas para diferentes campos en la misma parcela (Taylor 2005). En los casos de este estudio se graficaron los diagramas de Taylor de las 60 estaciones para cada modelo en R-Studio.

3.3.2 Habilidad del diagrama de Taylor

La evaluación del modelo de Taylor propone varias calificaciones de habilidades, las puntuaciones de habilidad se han definido para variar de cero (menos habilidoso) a



uno (más hábil). Obsérvese que, en el caso de una correlación relativamente baja, la inversa del RMSE no satisface el criterio de que la habilidad debe aumentar a medida que la varianza simulada se aproxima a la observada. Por lo tanto, una reducción del RMSE no necesariamente puede juzgar una mejora en la habilidad. Una de las puntuaciones menos complicadas que cumple con los requisitos anteriores se define como se muestra en la ec. 7:

$$S = \frac{4(1 + R)}{\left(\hat{\sigma}_f + \frac{1}{\hat{\sigma}_f}\right)^2 (1 + R_0)} \quad (\text{ec. 7})$$

Donde:

S = habilidad del diagrama de Taylor

R = coeficiente de correlacion de pearson

$\hat{\sigma}_f = \frac{\sigma_f}{\sigma_r} = \text{desviacion estandar normalizada}$

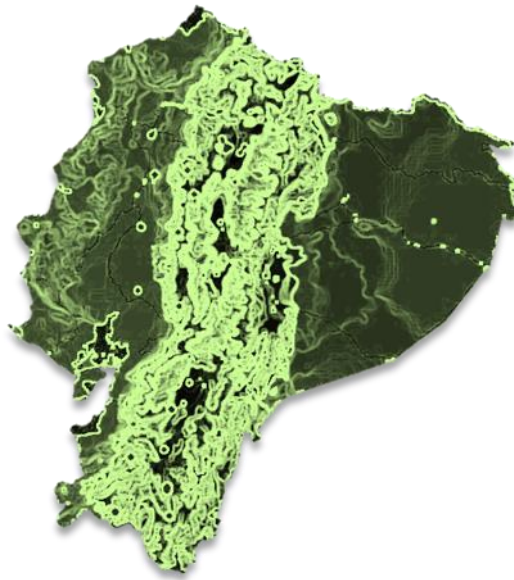
R₀ = máxima correlación alcanzable

La habilidad disminuye hacia cero a medida que la correlación se hace cada vez más negativa o cuando la varianza del modelo se acerca a cero o infinito. Para la varianza fija, la habilidad aumenta linealmente con la correlación. (Taylor 2001).



CAPÍTULO 4

RESULTADOS Y DISCUSIÓN





4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El objetivo general de este estudio es evaluar la precipitación mensual en el territorio ecuatoriano según los Modelos Globales de Clima del CMIP5 y de la reducción de escala dinámica mediante WRF a 10 km. Por lo tanto, en este capítulo se presentarán los resultados organizados por objetivos. En la sección 4.1 los resultados para el objetivo específico 1, en la sección 4.2 los resultados para el objetivo específico 2 y en la sección 4.3 el resultado para el objetivo específico 3. Se puede sintetizar en este capítulo de forma preliminar que los modelos globales no reproducen fielmente la precipitación observada, sin embargo nos muestran zonas de igual desempeño dentro de lo observable. El análisis comparativo determino que si existe una mejora en el pronóstico de lluvia al utilizar la reducción de escala dinámica.

4.1 ZONIFICACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LOS M-GCM

El primer objetivo específico de este estudio es evaluar las series de precipitación de los GCM en todo el Ecuador. De esta manera se pretende tener una idea más clara del desempeño de los GCM por regiones, y más aún tratar de identificar las zonas donde los GCM tienen un mejor o menor desempeño. Para esto se utilizaron dos criterios: el coeficiente de Pearson y el RMSE. En General, existen zonas con precipitaciones aceptables en la Costa y parte de la Sierra, en el valle interandino y la Amazonia el pronóstico de las precipitaciones dadas por los modelos Globales son bastante inexactas.

4.1.1 Evaluación por coeficiente de correlación de Pearson para el desempeño de los M-GCM

Se dividió los resultados en tres rangos, asignando un color a cada uno como podemos establecer en la gráfica inferior. En verde se estipulo valores entre 0,5 y 1. Amarillo para valores entre 0,3 y 0,5 y por último rojo al rango de -1 a 0,3. Los resultados se graficaron en ArcGIS, formando círculos concéntricos para cada estación. Cada círculo representa un modelo, siendo el CSIRO el de mayor diámetro, seguido del modelo GISS con un tamaño intermedio y por último el modelo IPSL más pequeño. Todo eso sobre un DEM y un shape que delimita el Ecuador.

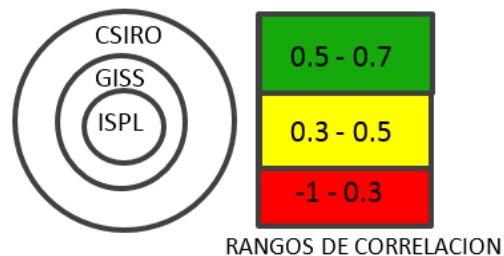


FIGURA 12: Rangos de correlación y asignación de círculos a cada modelo.

Los resultados del análisis correlación dan valores entre -0,3 y 0,64. La figura 13 compara los resultados obtenidos de cada modelo GCM. Se presenta una correlación aceptable en las estribaciones de la cordillera occidental y buena parte del sur del país, a más de advertir que hay una mala correlación en algunas estaciones como las de Ibarra, las de la cuenca del Paute y las de la zona que va desde el Puyo hasta Ambato, esto debido a las influencias transversales en las estructuras geográficas que forman hoyas abrigadas, que estos modelos en general no pueden detectar al contrastarlos con el DEM del Ecuador. Las estaciones de la cordillera oriental, zona sub-andina y planicie oriental tienen una correlación pobre debido a la influencia de los vientos alisios. Por otro lado, en las estaciones ubicadas en la cordillera costanera se aprecia una correlación entre intermedia y pobre, lo cual significa que la resolución del modelo es demasiado grande para captar la orografía y considera toda la Costa como una planicie

homogénea, posiblemente tampoco no existe una buena representación de la precipitación convectiva.

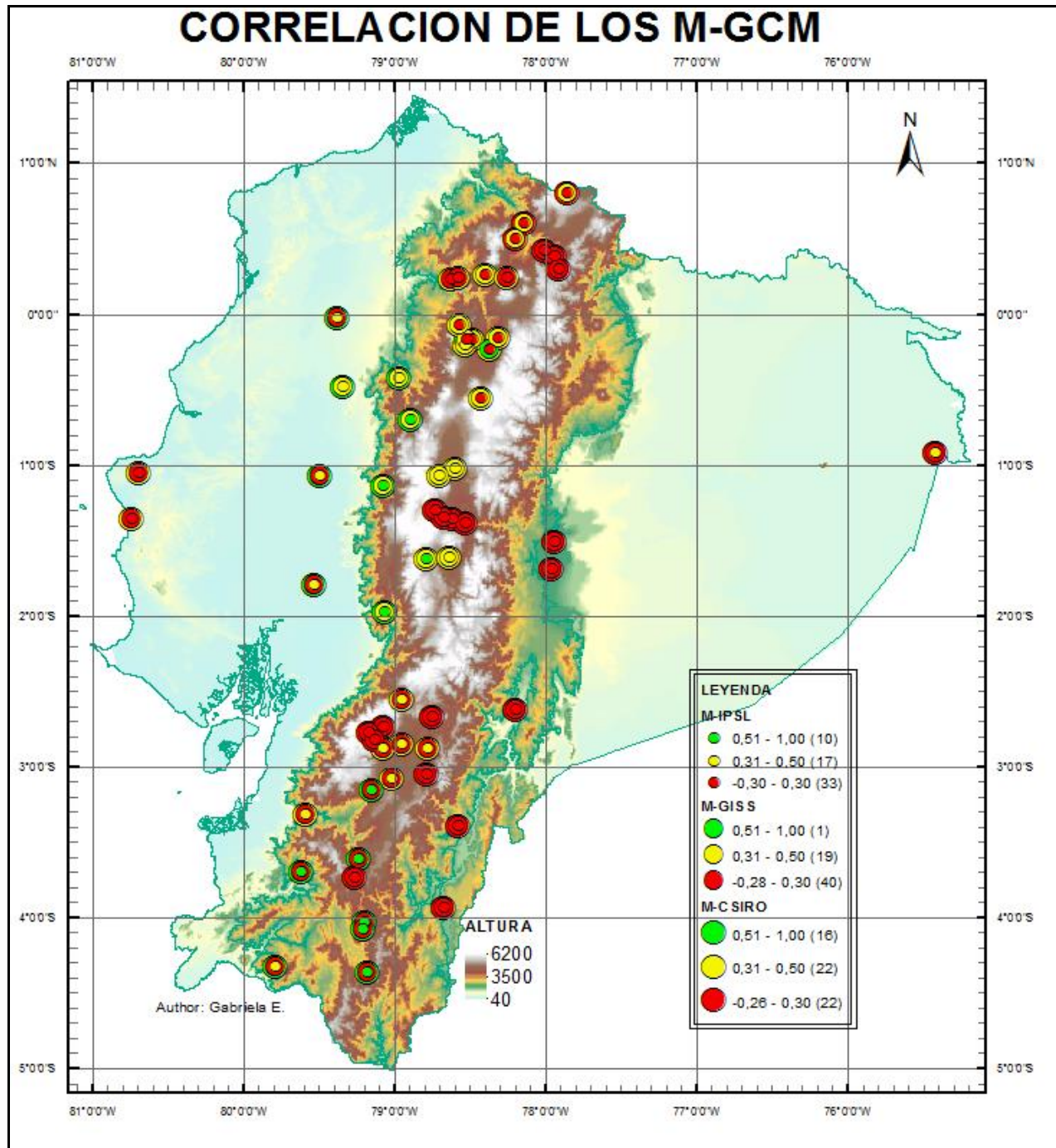


FIGURA 13: Mapa de comparación del coeficiente de correlación entre los M-GCM



La tabla 5 cuantifica las estaciones para cada región del país, rango y modelo utilizado. Se evidencia que M-CSIRO se adapta más a las observaciones y es coherente con la resolución de éste modelo que es mucho mejor que los demás modelos como se expuso en la tabla 2, seguido del M-IPSL que tiene una mejor resolución en dirección Este-Oeste y por último vemos que el M-GISS no tiene buena correlación.

TABLA 5: Resultados generales del coeficiente de correlación por regiones.

COEFICIENTE DE CORRELACIÓN DE PEARSON PARA M-GCM									
ESTACIONES	M-CSIRO			M-GISS			M-IPSL		
	ACEPTABLES	INTERMEDIAS	POBRES	ACEPTABLES	INTERMEDIAS	POBRES	ACEPTABLES	INTERMEDIAS	POBRES
COSTA (8)	5	3	0	0	1	7	1	5	2
SIERRA (46)	11	19	16	1	18	27	9	11	25
ORIENTE (6)	0	0	6	0	0	6	0	1	5
TOTALES (60)	16	22	22	1	19	40	10	17	33

La tabla proporciona una visión por regiones geográficas, se puede determinar que en la Costa y Sierra el M-CSIRO tiene mayor número de correlaciones aceptables e intermedias. Lo que traducido en términos de zonificación nos dice que los modelos globales presentan zonas de precipitación comparables para pronóstico en la Costa y parte de la Sierra, con el modelo CSIRO y GISS. El modelo GISS podría resultar útil analizando la zona del Oriente ya que se comporta de una manera mejor que los demás, aunque no del todo eficiente.

4.1.2 Evaluación por la Raíz del error cuadrático medio (RMSE)

El análisis por RMSE se compara en la figura 15. Los resultados generales muestran valores de RMSE de 37mm a 393mm que son bastante altos ya que se mide el error por la cercanía al cero. Por mejorar la interpretación de los resultados se grafico los resultados en Argis sobre un shape con las zonas climaticas del Ecuador se dividió

los resultados del RMSE en tres rangos determinados por los percentiles 40 (79mm) y 70 (114mm) y se les asignó colores representativos a cada rango. Dando como resultados valores aceptables entre el percentil 0 y 40 coloreados en azul claro, intermedios entre el 40 y 70 en azul medio y malos en entre 70 y 100 en azul oscuro. Estos rangos aplicamos a todos los gráficos del RMSE con la misma simbología que la correlación. La gráfica siguiente presenta la leyenda con los rangos respectivos.

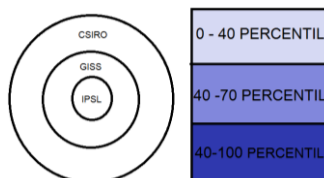


FIGURA 14: Rangos de RMSE y asignación de círculos a cada modelo

El estadístico RMSE permite medir el grado de correspondencia entre pares individuales de valores pronosticados y observados. De la figura 15 se aprecia que, a excepción de unas pocas estaciones, la representación de los tres modelos globales son similares. A grandes rasgos se observa que las zonas climáticas húmedas (A, B3) presentan un RMSE de intermedio a malo y las zonas climáticas sub húmedas o secas (C2, D, E) un RMSE de intermedio a aceptable, lo que es coherente con la cantidad de precipitación, a mayor precipitación mayor RMSE. Las estaciones de la cordillera costanera y unas pocas de la Sierra tienen un RMSE inversamente proporcional a la correlación. Esto nos indica que a pesar que la correlación pueda ser buena, la dispersión de los datos es mala. En el Oriente el RMSE y el coeficiente de Pearson son proporcionales e igualmente pobres.

TABLA 6: Resultados del RMSE para las regiones del Ecuador.

RMSE DE LOS M-GCM									
ESTACIONES	M-CSIRO PERCENTILES			M-GISS PERCENTILES			M-ISPL PERCENTILES		
	ACEPTABLE	INTERMEDIO	POBRE	ACEPTABLE	INTERMEDIO	POBRE	ACEPTABLE	INTERMEDIO	POBRE
COSTA (8)	0	3	5	0	3	5	1	2	5
SIERRA (46)	20	15	11	18	16	12	18	17	11
ORIENTE (6)	0	0	6	0	0	6	0	0	6
TOTALES	20	18	22	18	19	23	19	19	22



Los tres modelos funcionan mal en el Oriente y las vertientes occidentales y orientales de la cordillera de los Andes.

Por regiones se observa que la dispersión de los datos es bastante uniforme para los tres modelos ya que tiene valores a la par como se observa en la tabla superior. En la Costa el M-ISPL tiene un RMSE menor, en la Sierra el RMSE es aceptable y en el Oriente todos tienen valores similares. En resumen en cuanto al RMSE los tres modelos se desempeñan de manera similar.

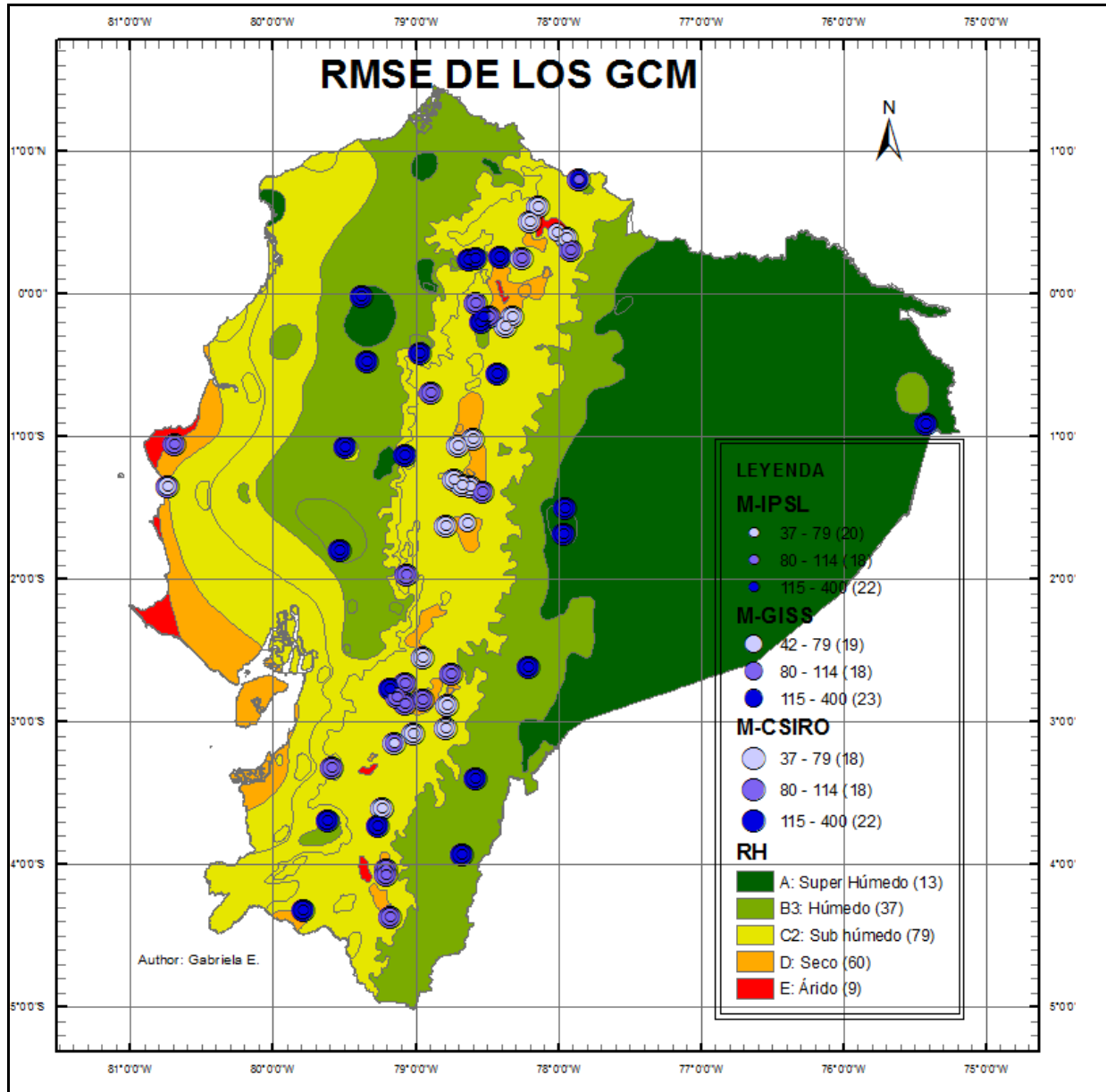


FIGURA 15: Mapa de comparación del RMSE entre los M-GCM.



4.2 ZONIFICACIÓN DE LOS W-WRF

El segundo objetivo específico de este estudio es evaluar la precipitación de los W-RCM en todo el Ecuador. Es decir, de los resultados de la reducción de escala de los GCM, de esta manera se pretende tener una idea más clara del desempeño de los W-RCM por regiones, y más aún tratar de identificar las zonas donde los W-RCM tienen un mejor o menor desempeño. De igual manera como con el objetivo anterior, se utilizaron dos criterios, el coeficiente de Pearson y el RMSE. Luego para jerarquizar los resultados se aplicó agrupamiento para identificar las zonas con similar desempeño. La zonificación que se puede apreciar por los diferentes modelos es básicamente la misma que en los modelos globales, aunque con mayores zonas de precipitación pronosticada aceptable.

4.2.1 Evaluación por el Coeficiente de correlación de Pearson

Los modelos del WRF mejoran la resolución de los GCM, como se constata en la figura 13 donde los tres modelos tienen una correlación similar dado que tiene la misma resolución. Los resultados Generales nos muestran que la correlación no es mayor a 0,7. Siguiendo las mismas categorizaciones que en la zonificación de los M-GCM vemos los siguientes resultados: Los modelos regionales son aceptables en la parte oeste de la cordillera de los Andes, una correlación de intermedia a pobre en el valle interandino y mala en todas las estaciones del Oriente. Asimismo se puede ver que a pesar de ser una zona bastante plana con alturas no mayores a 800m.s.n.m las estaciones que se encuentra en la zona costera específicamente en la cordillera costanera, no logran reproducir las condiciones pluviométricas de las observaciones. Esto podría significar que a pesar de tener una resolución de 10 km se necesita una mejor aún, ya que la orografía determina en gran medida la eficiencia de los modelos.



Por otro lado la diferencia puede deberse a parametrizaciones inadecuadas para esta zona específica.

En los valores totales de la Tabla 7 se muestra que el W-GISS es el que mayor desempeño del coeficiente de Pearson muestra con 23 estaciones aceptables totalmente contradictorio al hecho de que el CSIRO presenta mejores resultados en los modelos globales. Al analizar la tabla por regiones geográficas, en la Costa el W-CSIRO es mejor, el W-GISS y IPSL funcionan igual. En la Sierra es mejor el M-GISS, seguido del W-CSIRO y IPSL y en el Oriente hay una pequeña mejora en los modelos W-GISS IPSL y el W-CSIRO se mantiene igual que en el GCM.

TABLA 7: Resultados generales por regiones geográficas.

COEFICIENTE DE CORRELACIÓN DE PEARSON									
ESTACIONES	W-CSIRO			W-GISS			W-IPSL		
	ACEPTABLE	INTERMEDIA	POBRE	ACEPTABLE	INTERMEDIA	POBRE	ACEPTABLE	INTERMEDIA	POBRE
COSTA (8)	6	2	0	5	3	0	5	3	0
SIERRA (46)	12	21	13	18	18	10	11	21	14
ORIENTE (6)	0	0	6	0	1	5	0	1	5
TOTAL (60)	18	23	19	23	22	15	16	25	19

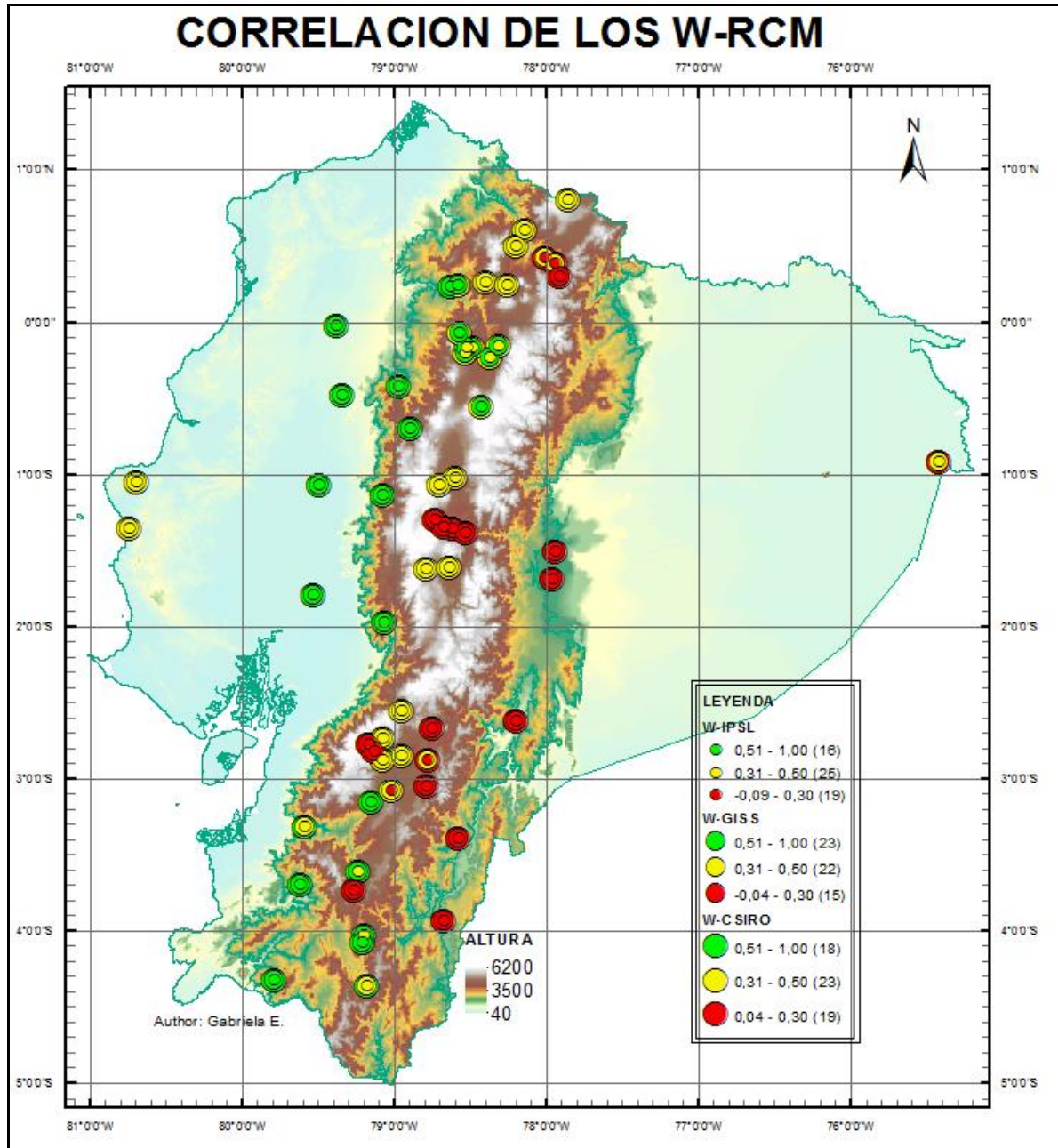


FIGURA 16: Mapa de comparación de correlación de los W-RCM.



4.2.2 Evaluación mediante la raíz del error cuadrático medio

Los valores que se pueden observar en la figura 17 son prácticamente los mismos para todos los modelos regionales. En la Costa las dos estaciones de la cordillera costanera tienen valores intermedios a aceptables, en las estribaciones de la cordillera occidental valores pobres, en el surco interandino y la zona sur de los Andes aceptables y malos para todo el Oriente. El aumento de resolución no mejora en gran medida el RMSE y sigue los patrones de los modelos globales. El modelo que tiene mayor cantidad de estaciones aceptables es el GISS seguido del ISPL, estos funcionando mejor que el CSIRO en la Costa y Sierra.

En la tabla 8 se aprecia que los valores del W-GISS son los que menor dispersión de datos presenta en términos generales, seguido del W-CSIRO e IPSL. Y por regiones se ve que en la Costa funciona mejor el W-GISS e IPSL y el que peor funciona es el W-CSIRO con un RMSE mayor. En la Sierra existe más estaciones con menor RMSE en el W-GISS y en el Oriente todos los modelos funcionan igual.

En cuanto a las zonas climáticas vemos que sigue el mismo patrón antes mencionado, encontrándose RMSE altos en zonas climáticas húmedas.

TABLA 8: Resultado del RMSE por regiones geográficas del Ecuador.

PERCENTILES DEL RMSE									
ESTACIONES	W-CSIRO			W-GISS			W-IPSL		
	ACEPTABLE	INTERMEDIO	POBRE	ACEPTABLE	INTERMEDIO	POBRE	ACEPTABLE	INTERMEDIO	POBRE
COSTA (8)	1	2	5	2	1	5	2	1	5
SIERRA (46)	28	14	4	31	13	2	29	15	2
ORIENTE (6)	0	2	4	0	2	4	0	2	4
TOTAL (60)	29	18	13	33	16	11	31	18	11

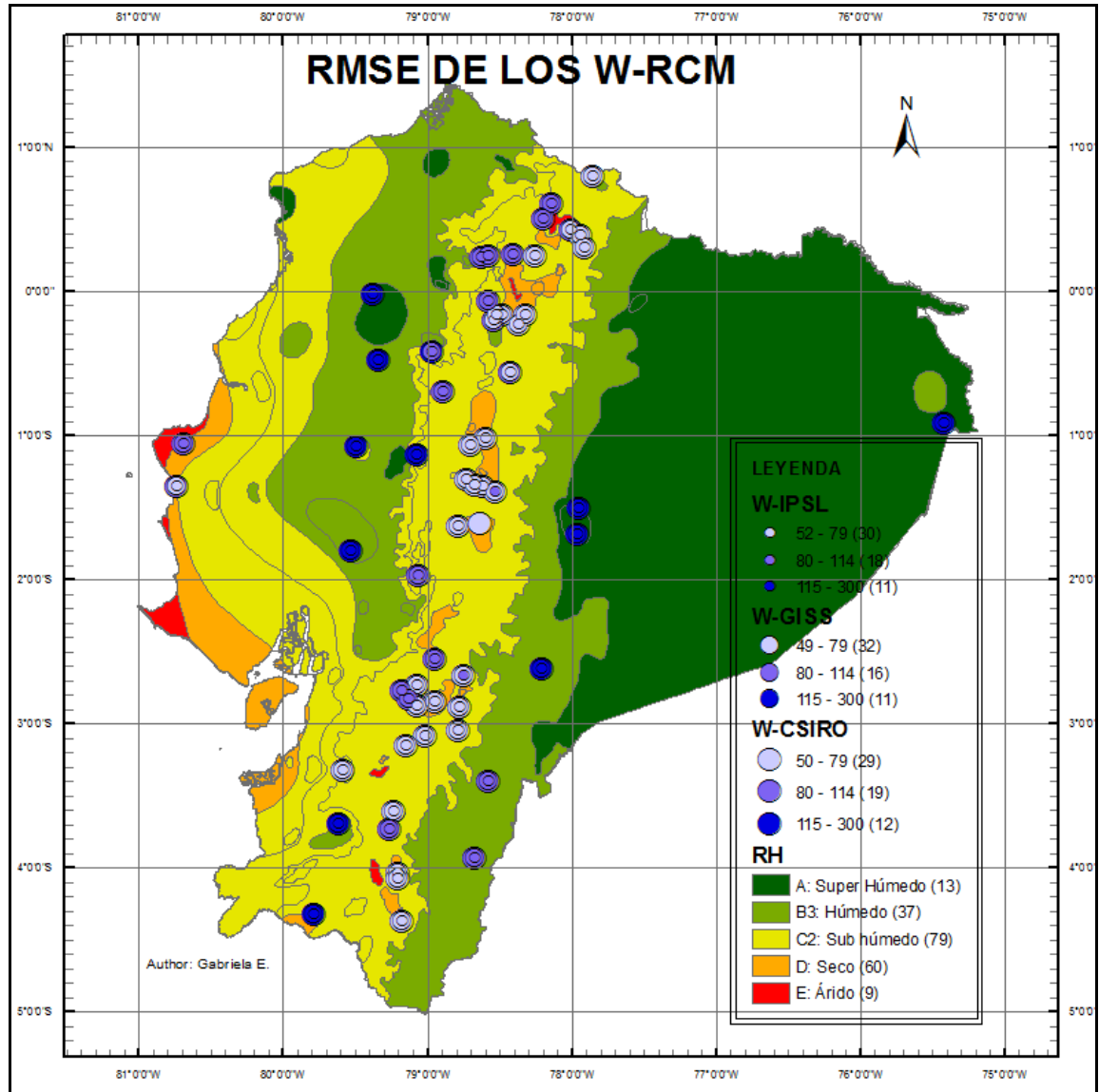


FIGURA 17: Mapa comparativo del RMSE entre los W-RCM.

4.3 EVALUACIÓN COMPARATIVA

El tercer objetivo específico de este estudio es la comparación del desempeño de los M-GCM con los resultados de los W-RCM. Esta comparación es importante para evaluar el valor agregado del procedimiento de reducción de escala dinámica. A nivel mundial se ha evaluado RCM y han mostrado que ayudan a representar de mejor manera que los GCM a las series de precipitación (Chacón y Vincenti 2011). Sin



embargo, por la ubicación del Ecuador en los trópicos y por tener varias influencias climáticas como la ZCIT, los Andes, la baja del Perú, entre otras, es importante evaluar los resultados de reducción de escala dinámica.

Esta evaluación comparativa se desarrolló mediante I) correlación, II) RMSE, y III) diagramas de Taylor y la habilidad del diagrama de Taylor.

4.3.1 Resultados Generales

En la tabla 9 se muestran los estadísticos de correlación, RMSE, desviación estándar observada y calculada y la habilidad del Diagrama de Taylor. Se puede observar una mejora significativa en los parámetros analizados. La correlación mejora poco, pero la desviación estándar de los WRF es mucho más cercana a las observaciones. Y la habilidad también demuestra claramente que el WRF tiene una mejora significativa ya que este parámetro puede variar desde 0 hasta 1.

TABLA 9: Resultados generales de los estadísticos evaluados

ESTAÍSTICOS	M-GCM		W-RCM	
	MIN	MAX	MIN	MAX
COEFICIENTE DE CORRELACIÓN DE PEARSON	-0,30	0,64	-0,1	0,7
RMSE	37	393	49	232
DESVIACIÓN ESTANDAR OBSERVADA	26	275	26	275
DESVIACIÓN ESTANDAR CALCULADA	1	9	40	209
DESVIACIÓN ESTANDAR NORMALIZADA (R)	0,01	0,31	0,44	2,65
HABILIDAD DEL DIAGRAMA DE TAYLOR (S)	0,00	0,26	0,35	0,92

4.3.2 Comparación de la correlación entre los M-GCM y W-RCM

Lo que ilustra la figura 18 y que resume la tabla 10 es que el modelo W-CSIRO mejora un total de 6 estaciones que representan menos que un 10 por ciento de ellas, de estas mejora solo 3 estaciones pasan de intermedias a aceptables y 3 de malas a intermedias y empeora 1 de intermedia a pobre. El resto de patrones se mantiene.

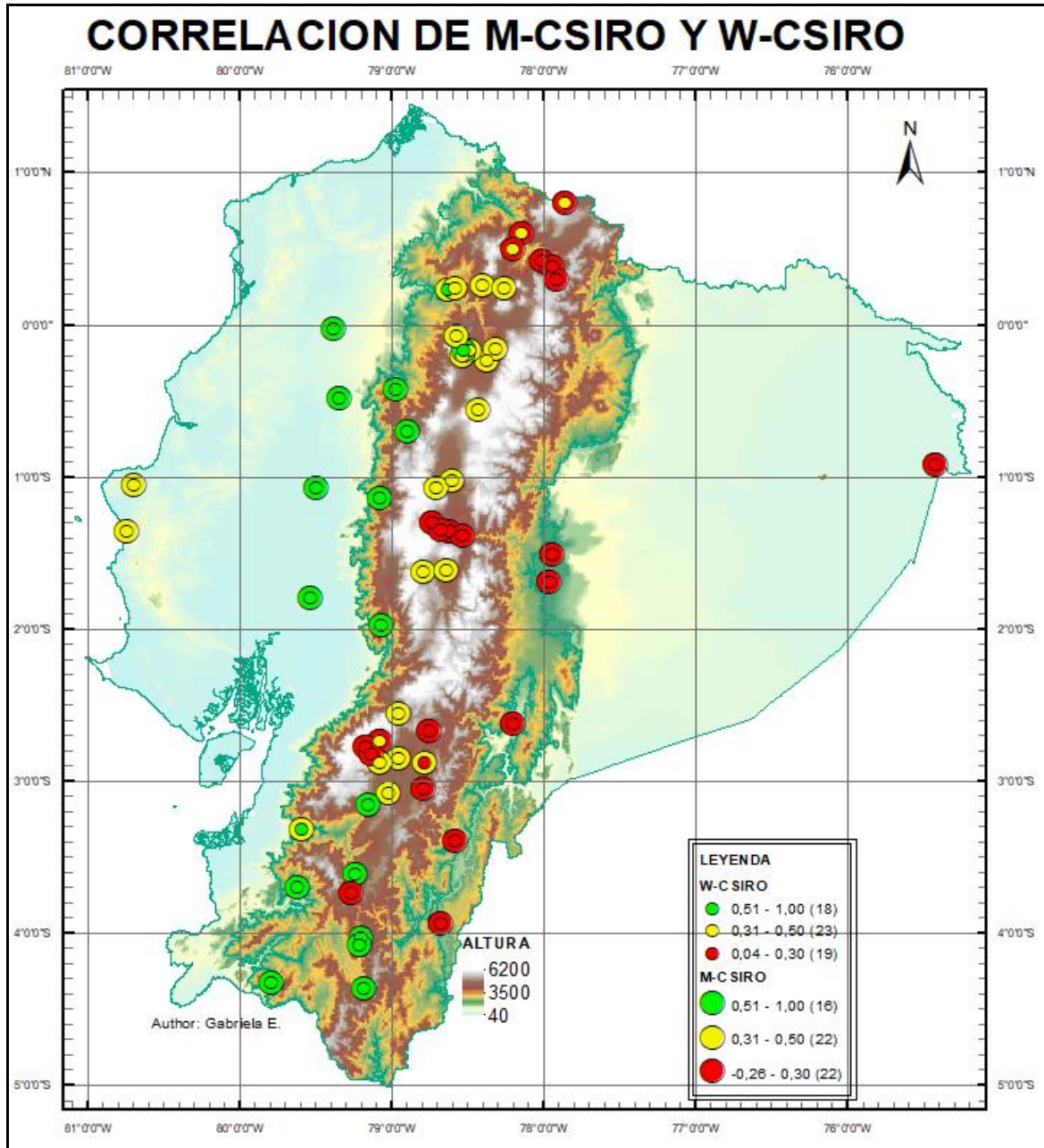


FIGURA 18: Mapa de comparación de la correlación entre el modelo M-CSIRO y W-CSIRO

En la figura 19 se analiza la correlación entre el modelo global M-GISS y W-GISS. Aquí se verifica muy bien que el aumento en la resolución mejora mucho los resultados en las precipitaciones. Sobre todo, en las estaciones de la Costa y las ubicadas el Oeste de la cordillera de los Andes. Incluso existe una mejoría de la correlación en las hoyas

del valle interandino y la cuenca del Paute. Por otro lado, se mantiene una mala correlación en las estaciones del Oriente. La influencia de los vientos alisios es determinante en la precipitación de esta zona.

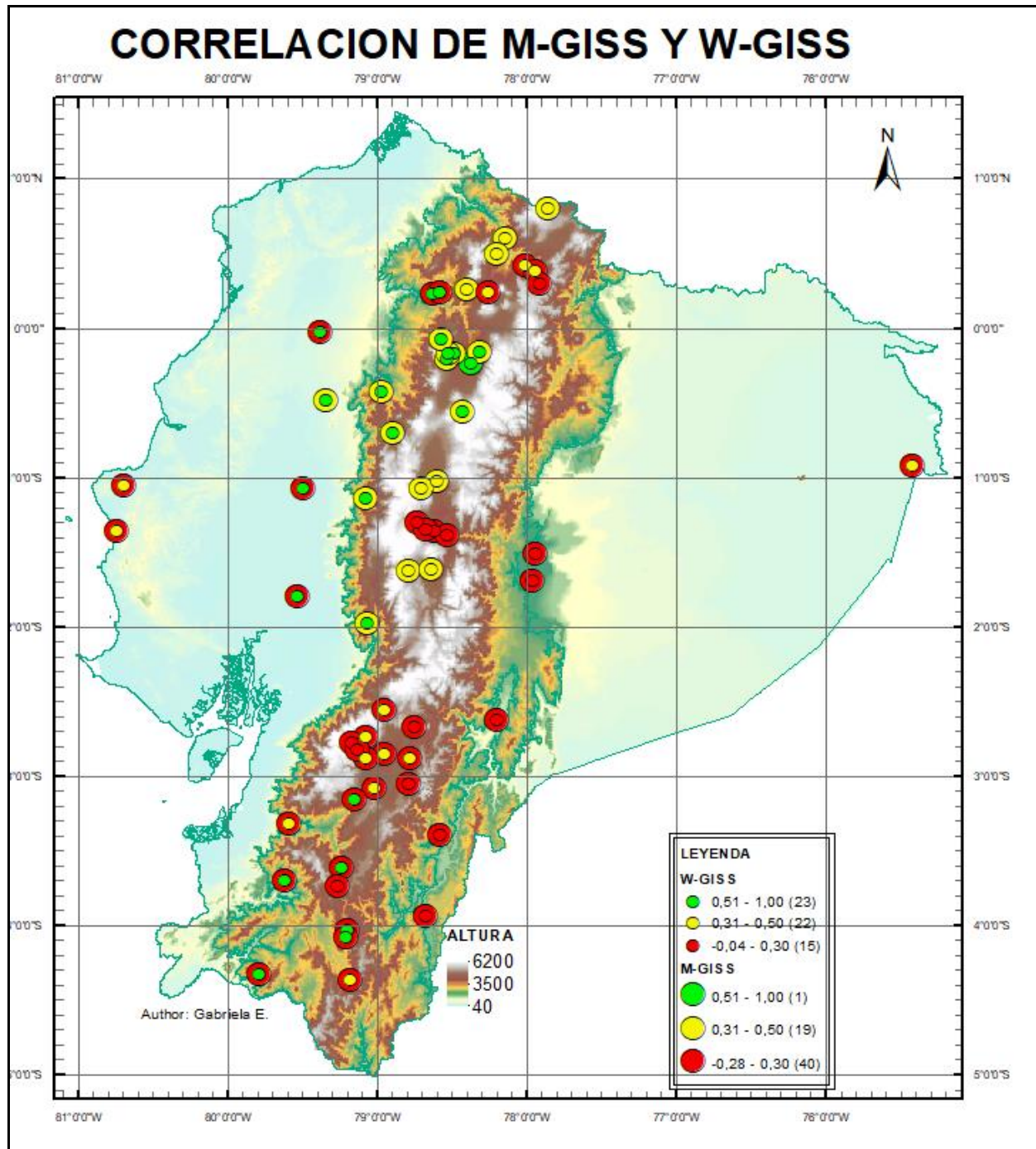


FIGURA 19: Comparación de la correlación entre los modelos M-GISS y W-GISS

Como la figura 20 lo muestra, en el modelo IPSL existe una mejora en la correlación de las estaciones debido al aumento de la resolución. Simultáneamente en las estaciones de la Costa con la cordillera occidental la correlación mejora con la resolución debido a que en estas estaciones se determina la precipitación por la influencia de las corrientes oceánicas y la circulación general para la zona tropical.

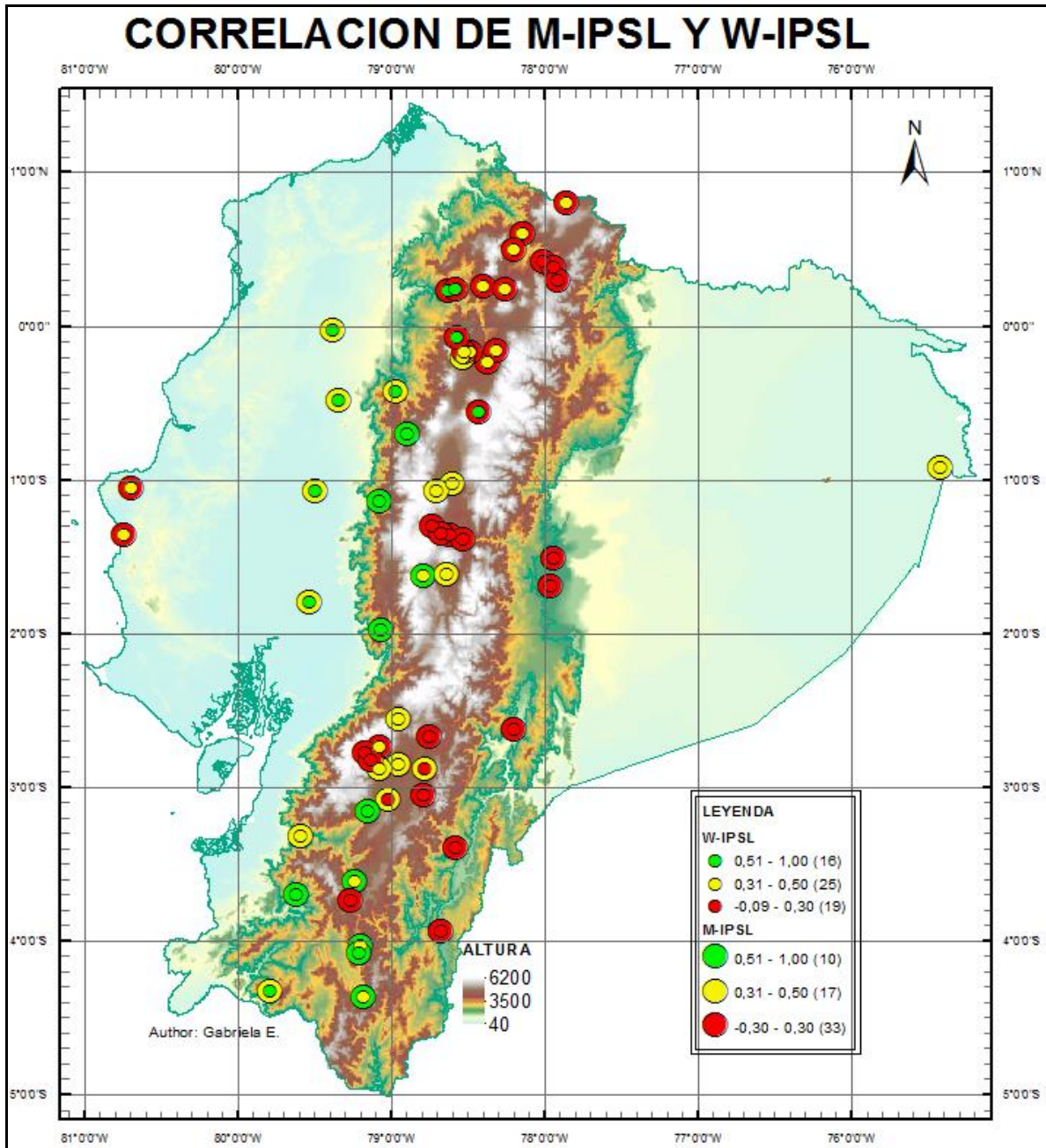


FIGURA 20: Comparación de la correlación de los modelos M-IPSL y W-IPSL.



El modelo W-GISS exhibe mejores resultados en la reducción de escala, seguido del W-IPSL y el W-CSIRO no mejora mayormente en cantidad, aunque en calidad sí.

En la tabla 10 se muestra un resumen de la evaluación comparativa de los modelos. Haciendo una simple regla de tres vemos que el W-CSIRO mejora un 10% de las observaciones, el W-GISS un 60% y el W-ISPL un 36,7%. Lo que demuestra que el W-GISS es el que mejor representa la correlación. Por regiones vemos igualmente el W-GISS es el que tiene mayor fiabilidad. En el Oriente la mejora es de un 1,6% que es insignificante.

TABLA 10: Conteo de Mejoras en los WRF

COEFICIENTE DE CORRELACIÓN DE PEARSON									
ESTACIONES	W-CSIRO			W-GISS			W-ISPL		
	MEJORA	MANTIENE	EMPEORA	MEJORA	MANTIENE	EMPEORA	MEJORA	MANTIENE	EMPEORA
COSTA (8)	1	7	0	8	0	0	6	2	0
SIERRA (46)	5	40	1	27	19	0	16	24	6
ORIENTE (6)	0	6	0	1	5	0	0	6	0
TOTAL (60)	6	53	1	36	24	0	22	32	6

4.3.3 Comparación del RMSE entre los 6 modelos climáticos

Se observa en la figura 21 que el modelo W-CSIRO mejora el RMSE con el aumento de resolución en estaciones de la parte centro y sur de los Andes y en estaciones del norte empeora el RMSE. Estos mapas de comparación adicionalmente nos permiten visualizar con mayor facilidad las zonas con igual rango de valores de RMSE, presentando claras zonificaciones por regiones y por accidentes orográficos. Como consecuencia de ello, en la Costa podemos dividir la zona de la cordillera costanera como de RMSE aceptable, y la planicie conocida como la fosa de hundimiento del Guayas. La Sierra presenta el valle interandino con RMSE aceptable y la cordillera occidental con RMSE malo. El Amazonia tiene una sola zona con RMSE pobre.

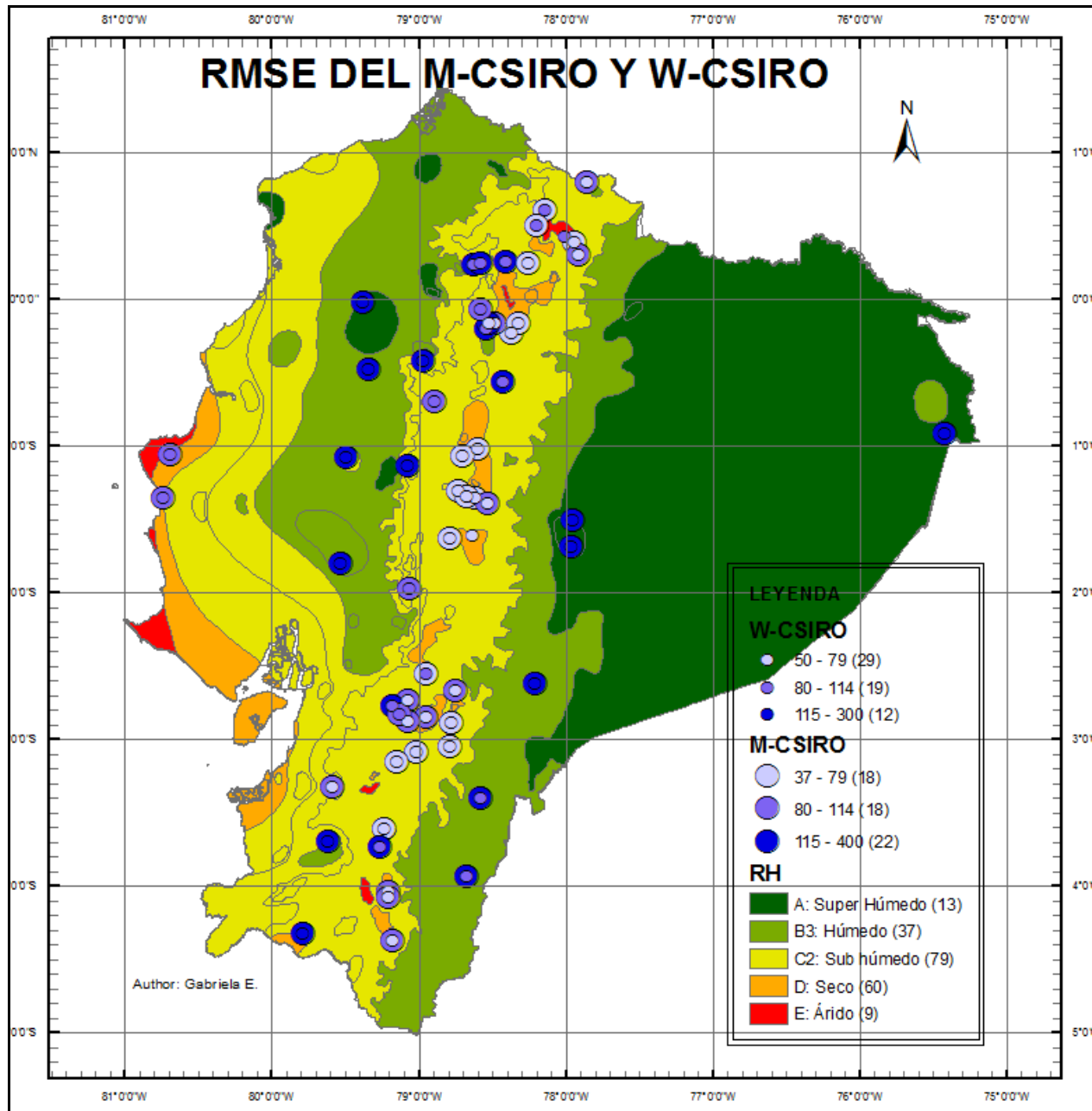


FIGURA 21: Mapa comparativo del RMSE del modelo W-CSIRO y M-CSIRO.

En la figura 22 vemos la comparación entre el modelo M-GISS y W-GISS y se aprecia claramente que existe una buena reducción del error con el aumento de la resolución en las estaciones de la Sierra. Las mismas configuraciones zonales que en el modelo CSIRO se reproducen en el modelo GISS.

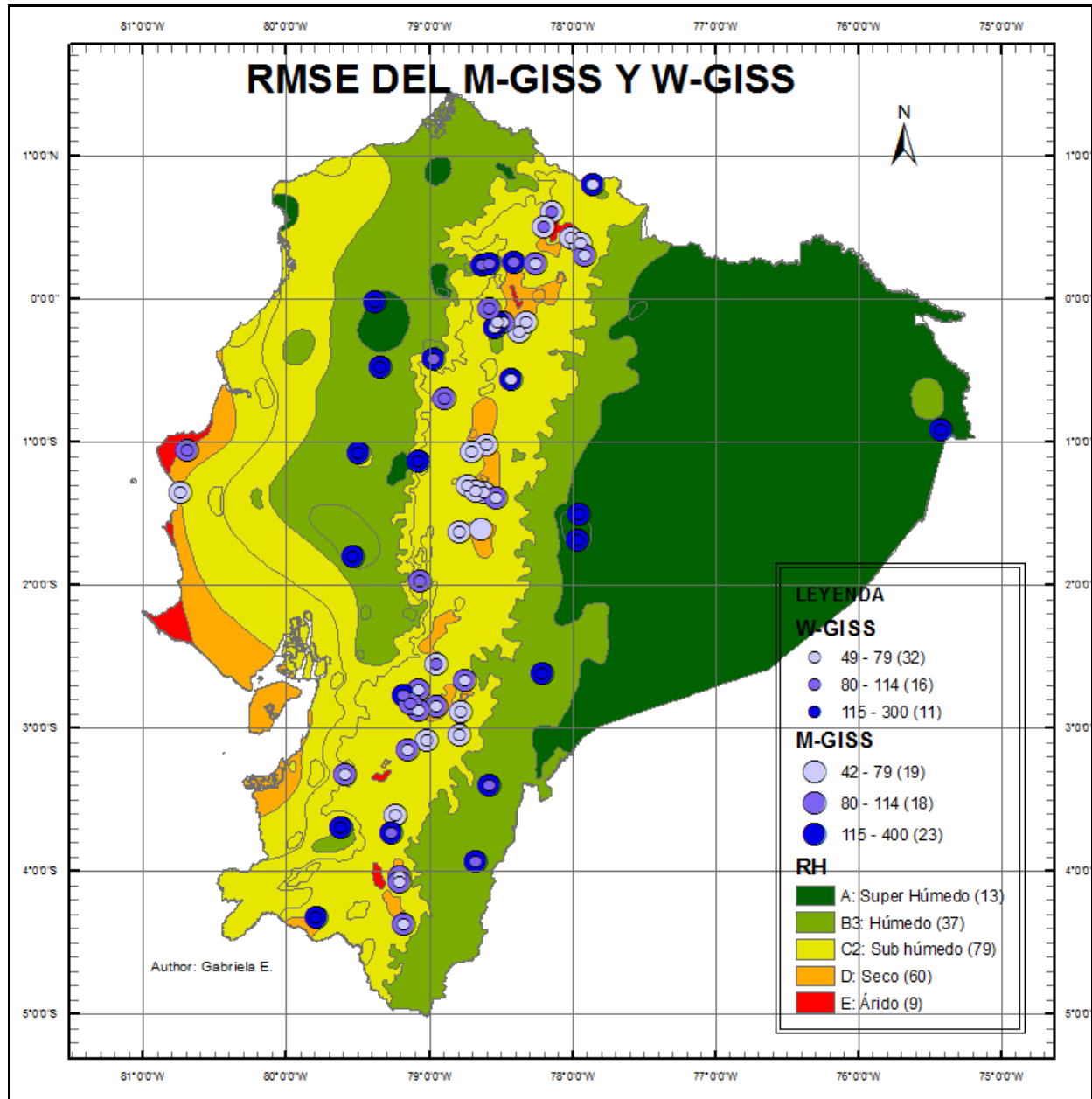


FIGURA 22: Mapa Comparativo del RMSE del modelo W-GISS y M-GISS.

El IPSL al igual que los otros modelos ha disminuido el error cuadrático con el aumento de la resolución siguiendo la pauta de los modelos anteriores como se advierte en la figura 23.

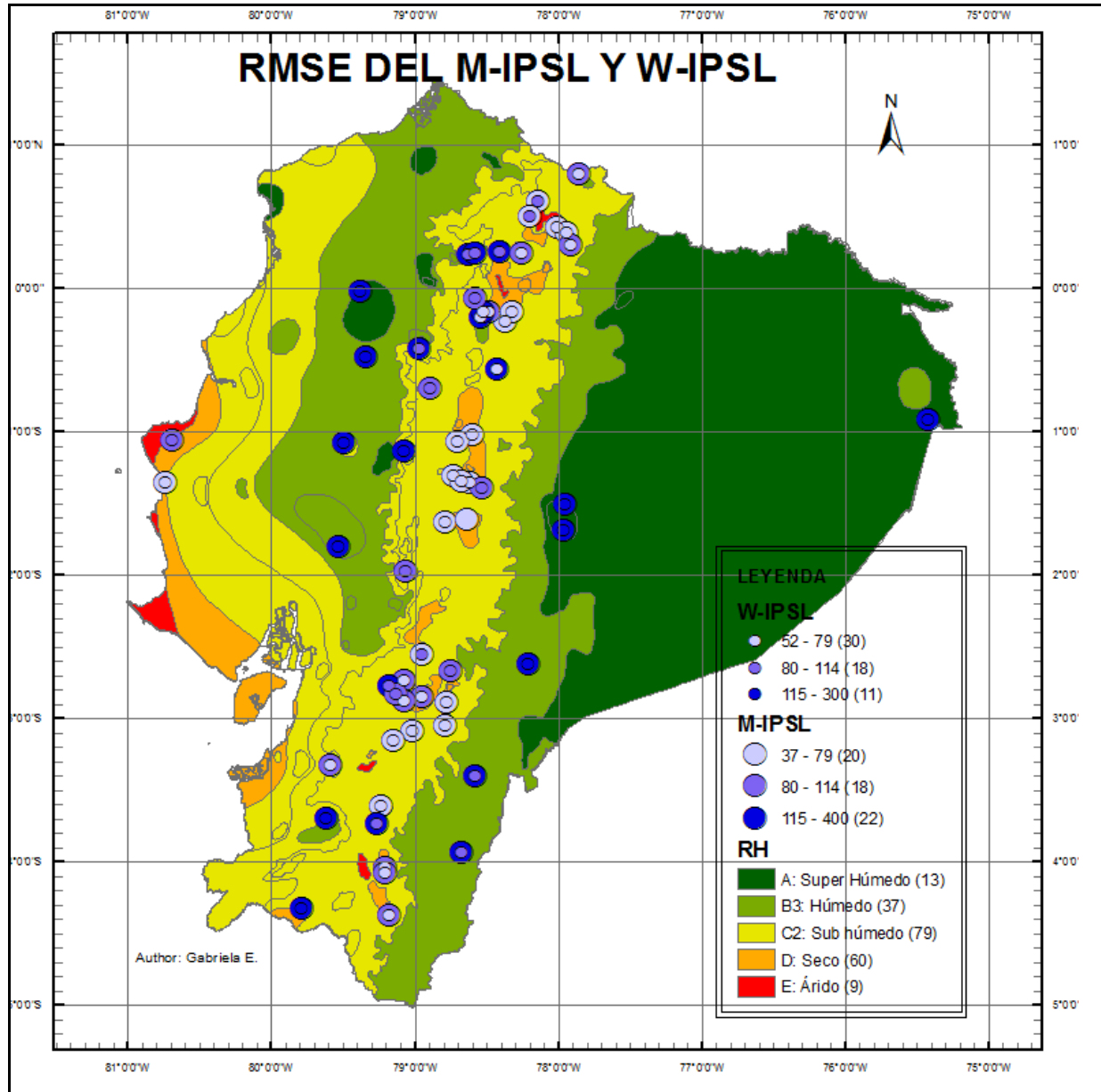


FIGURA 23: Mapa comparativo del RMSE del modelo W-ISPL y M-ISPL.

Los resultados generales de la tabla 11 muestra que en al igual que la correlación en el RMSE el que mayores mejoras presenta es el W-GISS. Este funciona mejor en la Costa y la Sierra y todos funcionan igual en el Oriente. En resumen, los tres modelos mejoran con la reducción de escala y reflejan los mismos patrones de zonificación en las diferentes regiones y por los accidentes orográficos propios del Ecuador.



TABLA 11: Conteo de las mejoras por regiones

RMSE									
ESTACIONES	W-CIRO			W-GISS			W-ISPL		
	MEJORA	MANTIENE	EMPEORA	MEJORA	MANTIENE	EMPEORA	MEJORA	MANTIENE	EMPEORA
COSTA (8)	1	7	0	2	6	0	1	7	0
SIERRA (46)	18	24	4	22	21	3	20	23	3
ORIENTE (6)	2	4	0	2	4	0	2	4	0
TOTAL (60)	21	35	4	28	31	3	23	34	3

4.3.4 Diagrama de Taylor y la métrica de la habilidad de los modelos

Como observamos en la figura 24, el diagrama de Taylor muestra una mejor desviación estándar en el WRF. En los gráficos de los modelos regionales podemos ver que la desviación mejora ampliamente, esto nos dice que además de mejorar la correlación el WRF nos ayuda a mejorar la desviación estándar y por último el RMSE presenta mayor dispersión de datos en los modelos regionales.

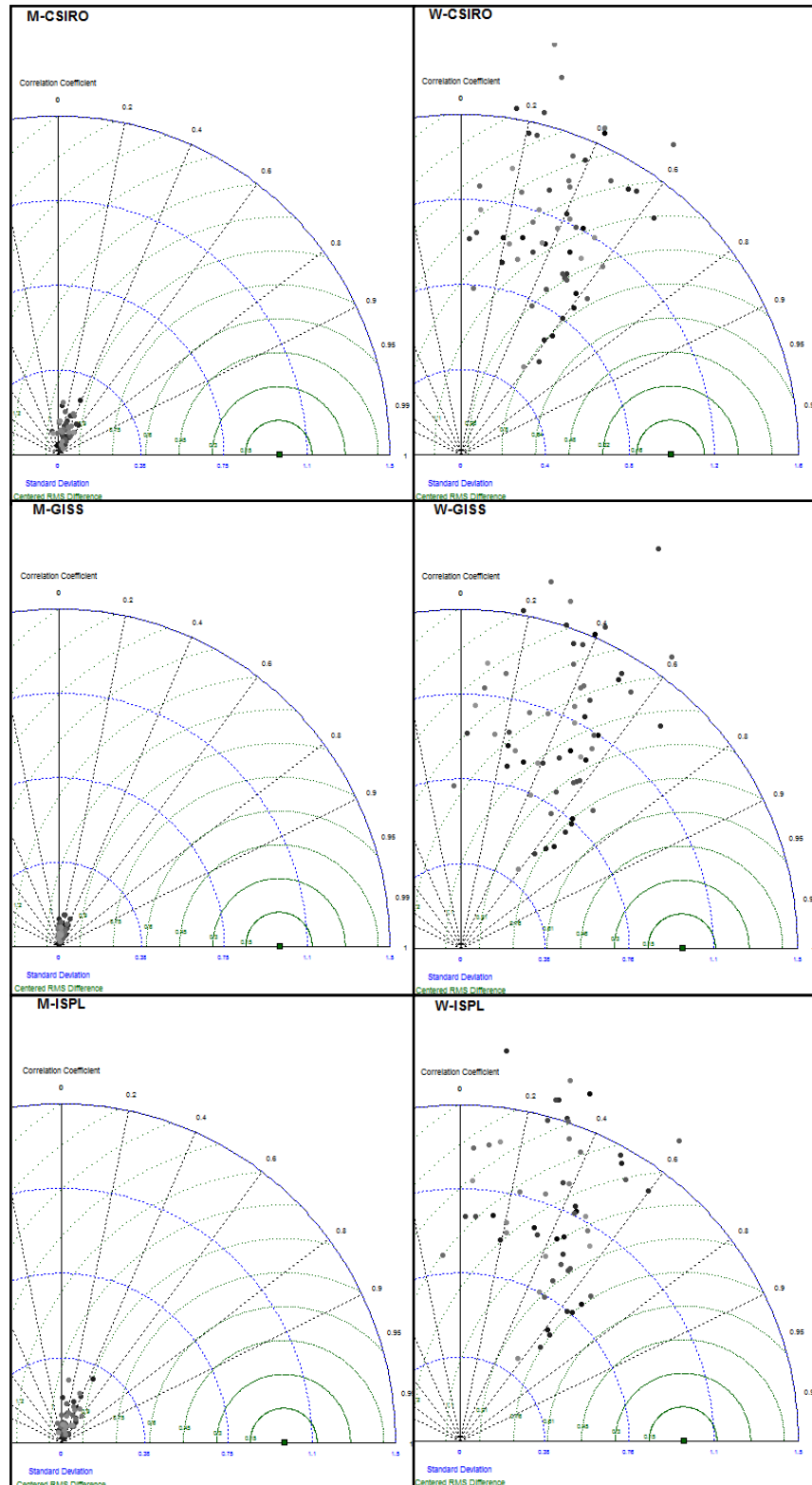


FIGURA 24: Diagrama de Taylor de los 3 GCM y 3 WRF.

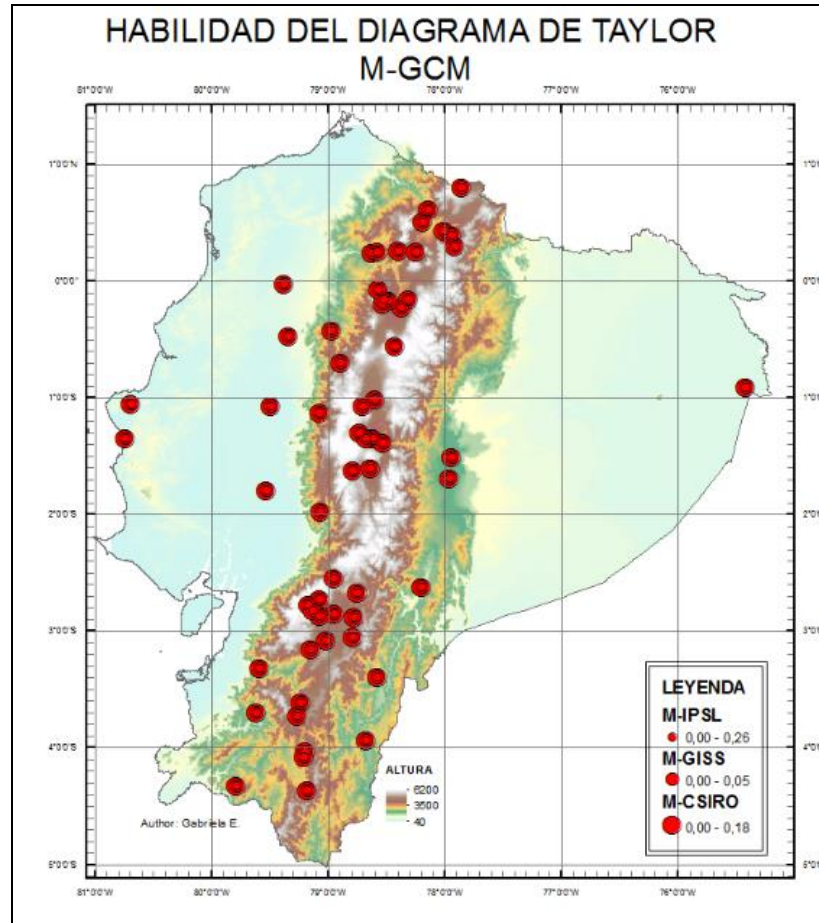


FIGURA 25: Diagrama de la habilidad de Taylor para los M-GCM

En las figuras 25 y 26 de la habilidad del diagrama de Taylor, que nos dice que tan hábil es un modelo al considerar todos los estadísticos utilizados, dándonos valores cercanos a cero como modelos no hábiles y cercanos a uno como hábiles. Clasificamos en tres rangos de valores con diferentes colores. Verde para valores entre 0,7 y 1 designándoles como aceptables. Amarillo para valores entre 0,3 y 0,7 valores intermedios y rojo valores entre 0 y 1 como valores malos. De esto se pudo concluir que ningún modelo global tiene una habilidad aceptable, todos son malos. Y en los modelos regionales independientemente todos tienen valores entre intermedios y aceptables en las mismas regiones geográficas. Básicamente la habilidad del modelo de Taylor divide al Ecuador con la cordillera de los Andes, con esto podemos

nuevamente concluir que los modelos regionales tampoco logran plasmar los fenómenos locales que se producen por los microclimas de los Andes y los vientos alisios procedentes del Amazonia.

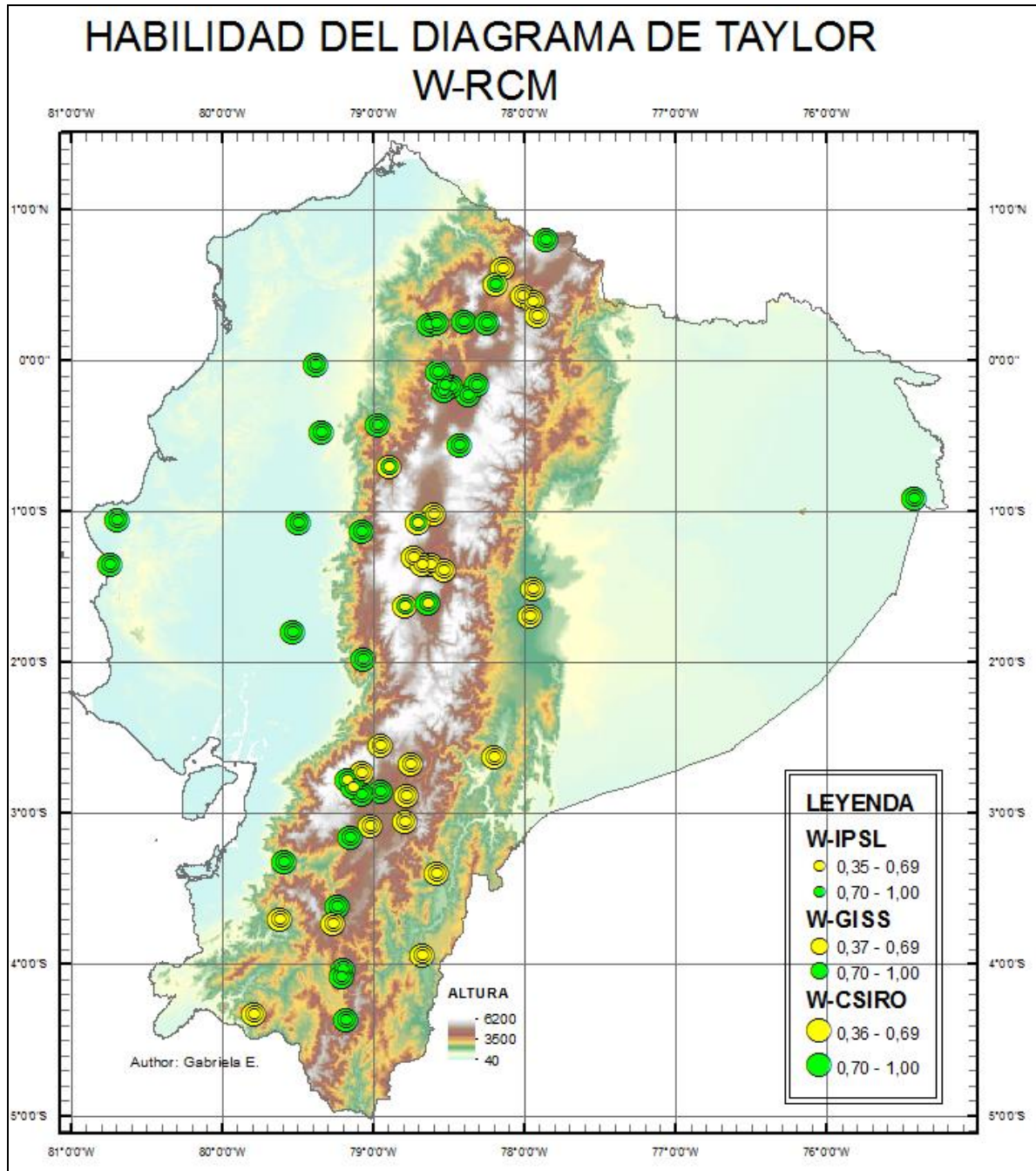


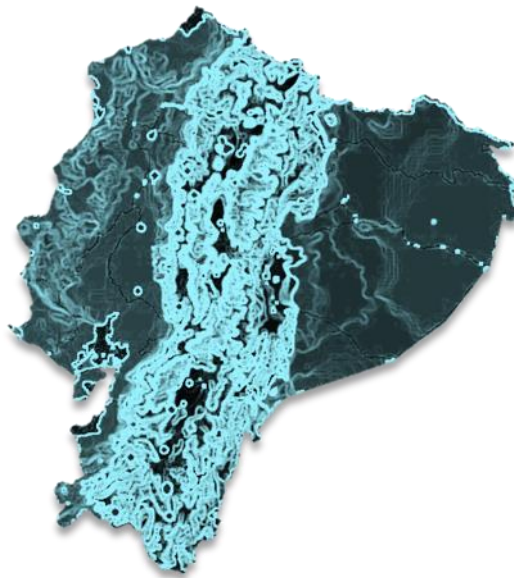
FIGURA 26: Diagrama de la habilidad de Taylor para los W-RC



CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y

RECOMENDACIONES





5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

En esta tesis se ha argumentado la posibilidad de construir zonas de desempeño de los modelos climáticos globales y regionales y la comparación de los mismos, a partir de análisis estadísticos básicos. Las siguientes conclusiones se pueden extraer de este estudio para cada objetivo:

En el primer objetivo de zonificación del desempeño de los M-GCM. La correlación nos muestra valores aceptables en algunas estaciones de la Costa y parte de los Andes Occidentales principalmente en el M-CSIRO. En el modelo M-GISS y M-ISPL la correlación es especialmente baja. En cuanto al RMSE, tomados en conjunto, los resultados sugieren que los tres modelos se comportan de forma similar y presentan un RMSE considerado aceptable o intermedio en el valle interandino y la cordillera costanera, siendo pobre en el resto del país, además que este es acorde con la variabilidad climática, en donde se puede intuir que en zonas de alta precipitación el RMSE es mayor. Podemos concluir, a partir de los datos, que los modelos climáticos globales reproducen de manera un tanto baja la precipitación. Sin embargo, nos presentan zonas de desempeño similar que se pueden estudiar más a fondo en la reducción de escala dinámica.

Siguiendo con el segundo objetivo de crear una zonificación del desempeño de los W-RCM. En síntesis, se puede observar que el modelo W-GISS es el que mejor desempeño tiene tanto en correlación como en RMSE. Los W-CSRO y W-ISPL tienen una diferencia muy poco significativa pero de menor desempeño. Las zonas de mejor



desempeño para los tres modelos globales son la Costa ecuatoriana y todo lo largo de la cordillera de los Andes Occidentales. Las hoyas de los valles interandinos y la Amazonia requerirían una disminución adicional de la resolución. Adicionalmente se observó que los resultados presentan el mismo patrón que los modelos globales pero con mejora en la calidad del pronóstico.

En cuando a la evaluación comparativa de los modelos. La evidencia surgida de estudio apunta que la reducción de escala dinámica mejora significativamente la eficiencia de los modelos. La correlación mejora de un rango de -0,3 a 0,6 a uno de -0,1 a 0,7, el RMSE disminuye de un máximo de 393mm a uno de 232mm y comparando con las observaciones, la desviación estándar es la que presenta mayor mejoría, con un máximo en las observaciones de 275mm, en los M-GCM de 9mm y en los W-RCM de 209mm. Resumiendo todos los estadísticos con el diagrama de Taylor que mide la eficiencia en términos de la habilidad de los modelos, se concluye que los GCM presentan una habilidad pobre y los RCM una habilidad entre intermedia y aceptable. Lo que demuestra la hipótesis de que al reducir la escala el WRF a 10km se mejora la eficiencia de los modelos. Aun así, los modelos no reproducen adecuadamente la precipitación en zonas climáticas de la Sierra y el Oriente donde existen fenómenos ambientales de difícil modelación matemática.

Concluyendo esta sección podemos en conjunto decir que al graficar vemos que la influencia de la cordillera de los Andes es determinante en la calibración de los modelos ya que a pesar de la reducción de escala no se logra captar a los fenómenos de precipitación que se dan en las cuencas interandinas, debido a la existencia de cordilleras transversales que forman climas locales como, las cuencas abrigadas de Ibarra y Paute, asimismo de la zona entre el Puyo y Ambato y toda la amazonia, además de la influencia de los vientos alisios que suben del valle amazónico a la cordillera real y que cambian el sistema climático de esta zona.

Los resultados de esta investigación apoyan la idea de una zonificación de los modelos en base a la orografía y zonas climáticas del Ecuador para determinar en correspondencia qué modelo funciona mejor con cada una.



Este estudio se limitó a los datos facilitados por la tercera comunicación de cambio climático, y considerando que los datos son de un periodo del 2005 hacia atrás, nos queda la incógnita de que, si consideramos los valores actuales de pronóstico y al mismo tiempo de observaciones, la evaluación de estos podría haber aumentado la eficiencia de los modelos.

5.2 RECOMENDACIONES

Si consideramos que los errores de los modelos regionales se determinan por la influencia de las condiciones de frontera de los modelos Globales de entrada podemos ver que tenemos un desfase grande a la hora de pronosticar las precipitaciones futuras ya que estos no reproducen las condiciones climáticas locales, se basan en la circulación general y las corrientes oceánicas que en el Ecuador son propias de la zona tropical. Y esta influencia se corta por la presencia de la cordillera de los Andes, determinando así que solo las estaciones que no se vean interrumpidas con ella puedan tener una buena aproximación. A más de impedir la interacción de estas corrientes con los vientos procedentes de la zona baja amazónica. El aumentar la resolución ayuda a obtener mejores resultados, pero solamente en las mismas zonas que no se ven afectadas por estos fenómenos.

Se podría considerar la idea de estudiar las zonas climáticas del Ecuador y plantear un modelo que vaya de lo local a lo regional. Dividiendo los modelos en diferentes zonas de estudio y aplicando diferentes parametrizaciones a cada una.

Se debería también aumentar el número de estaciones especialmente en la Costa y Amazonia y tener un buen control de las estaciones existentes ya que debido a las limitaciones de los datos no se pudo hacer el análisis con un mayor número de estaciones. Considerando que de 123 estaciones solo se pudo utilizar 60. Lo que nos deja un amplio camino aún por recorrer en el ámbito del pronóstico y de la obtención de información.





BIBLIOGRAFÍA

- AMADOR, J.A. y ALFARO, E., 2009. Métodos de reducción de escala: aplicaciones al tiempo, clima, variabilidad climática y cambio climático. *Revista Iberoamericana de Economía Ecológica (REVIBEC)*, no. 11, pp. 39-52. ISSN 1390-2776.
- ANDALE, 2016. RMSE: Root Mean Square Error. *Statistics How To* [en línea]. [Consulta: 16 septiembre 2017]. Disponible en: <http://www.statisticshowto.com/rmse/>.
- ANDERSON, D.R., SWEENEY, D.J., WILLIAMS, T.A., ROA, M. del C.H. y ÁLVAREZ, T.L., 2001. *Estadística para administración y economía*. S.I.: International Thomson. ISBN 968-7529-41-5.
- ARMENTA, G., VILLA, J. y JÁCOME, P., 2016. *Proyecciones Climáticas de precipitación y temperatura para Ecuador, bajo distintos escenarios de cambio climático*. junio 2016. S.I.: s.n.
- BUYTAERT, W., VUILLE, M., DEWULF, A., URRUTIA, R., KARMALKAR, A. y CÉLLERI, R., 2010. Uncertainties in climate change projections and regional downscaling in the tropical Andes: Implications for water resources management. [en línea], [Consulta: 4 septiembre 2017]. DOI 10.5194/hess-14-1247-2010. Disponible en: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/22084>.
- CABRÉ, M.F., 2011. *Uso de un modelo climático regional para estimar el clima en Sudamérica subtropical para el futuro lejano. Estimación de incertidumbres del modelo*. 2011. S.I.: Tesis de Doctoral. Facultad de Ciencias Exáctas y Naturales. Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos. Universidad de Buenos Aires.
- CAMPOZANO, L., VÁZQUEZ-PATIÑO, A., TENELANDA, D., FEYEN, J., SAMANIEGO, E. y SÁNCHEZ, E., 2017. Evaluating extreme climate indices from CMIP3&5 global climate models and reanalysis data sets: a case study for present climate in the Andes of Ecuador. *International Journal of Climatology*, vol. 37, pp. 363-379. ISSN 1097-0088. DOI 10.1002/joc.5008.
- CASTRO, D., 2009. Modelos climáticos globales y regionales globales y regionales Escenarios de cambio climático en Europa. *instituto de ciencias ambientales de castilla-la mancha* [en línea]. powerpoint. España. Disponible en: http://www2.aemet.es/web/sup/ciencia/divulga/escen_curso/pdf/Castro.pdf.
- CEDEÑO, J. y DONOSO, M.C., 2010. Atlas Pluviométrico del Ecuador. , ISSN 9290891408.
- CHACÓN, E.P. y VINCENTI, S.S., 2011. Validación de los Modelos de Cambio Climático hidrostáticos y no hidrostáticos sobre la climatología de Ecuador en las variables de precipitación y temperaturas extremas. *La Granja*, vol. 13, no. 1, pp. 21-30. ISSN 1390-8596. DOI 10.17163/lgr.n13.2011.03.



- DE FRIAS, E., 2015. Geografía de Ecuador. *EDUpunto.com* [en línea]. [Consulta: 15 septiembre 2017]. Disponible en: <https://es.slideshare.net/edefrias/geografa-de-ecuador>.
- DÍAZ, D., BOJACÁ, B., GIL, R., GUTIÉRREZ, F., BURGOS, J., RIASCOS, J., VILLALOBOS, G. y CALA, F., 2017. *Modelado y simulación de sistemas naturales* [en línea]. primera. Bogotá: UTADEO. [Consulta: 8 octubre 2017]. ISBN: 978-958-725-202-6. Disponible en: <http://www.utadeo.edu.co/es/publicacion/libro/editorial/235/modelado-y-simulacion-de-sistemas-naturales>.
- FERNÁNDEZ, J., FITA, L., GARCÍA-DÍEZ, M., MONTÁVEZ, J.P., JIMÉNEZ-GUERRERO, P., DOMÍNGUEZ, M., ROMERA, R., LÓPEZ DE LA FRANCA, N., SÁNCHEZ, E. y LIGUORI, G., 2012. Escenarios-PNACC 2012: Resultados de regionalización dinámica. *Cambio Climático: Extremos e impactos*,
- FOLLOS, F., 2012. *Manual básico para el tratamiento de datos de calidad del aire mediante el lenguaje estadístico R y paquetes adicionales como OPENAIR* [en línea]. 2012. S.l.: s.n. Disponible en: http://www.openair-project.org/PDF/R_Openair_aplicado_a_calidad_del_aire.pdf.
- FOWLER, H.J., BLENKINSOP, S. y TEBALDI, C., 2007. Linking climate change modelling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling. *International Journal of Climatology*, vol. 27, no. 12, pp. 1547-1578. ISSN 1097-0088. DOI 10.1002/joc.1556.
- GAERTNER, M.Á., GUTIÉRREZ, J.M. y CASTRO, M., 2011. Escenarios regionales de cambio climático. *Revista Española de Física* [en línea], vol. 26, no. 2. [Consulta: 8 octubre 2017]. ISSN 0213-862X. Disponible en: <http://revistadefisica.es/index.php/ref/article/view/1331>.
- GEO, 2015. Cálculo de la Raíz del Error Cuadrático Medio o RMSE (Root Mean Squared Error). *Gestión de Operaciones* [en línea]. [Consulta: 16 septiembre 2017]. Disponible en: <https://www.gestiondeoperaciones.net/proyeccion-de-demanda/calculo-de-la-raiz-del-error-cuadratico-medio-o-rmse-root-mean-squared-error/>.
- GUANUCHI, J.C., 2015. *Análisis comparativo de Downscaling estadístico y dinámico en las cuencas de los ríos Paute y Jubones* [en línea]. Estudio. Cuenca: Universidad de Cuenca. [Consulta: 4 septiembre 2017]. Disponible en: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/21352>.
- HARTIGAN, J.A. y WONG, M.A., 1979. Algorithm AS 136: A K-Means Clustering Algorithm. *Applied Statistics*, vol. 28, no. 1, pp. 100. ISSN 00359254. DOI 10.2307/2346830.
- HIGUERAS, Á.M.G., GARCÍA ORTEGA, E., MATELLÁN OLIVERA, V. y SÁNCHEZ GÓMEZ, J.L., 2012. Procesamiento paralelo de los pronósticos meteorológicos del modelo WRF mediante NCL. [en línea], [Consulta: 4 septiembre 2017]. Disponible en: <http://buleria.unileon.es/xmlui/handle/10612/2222>.



- INZUNZA, J., 2010. *Meteorología descriptiva* [en línea]. S.l.: s.n. [Consulta: 6 octubre 2017]. Disponible en: http://nimbus.com.uy/weather/Cursos/Curso_2006/Textos%20complementarios/Meteorologia%20descriptiva_Inzunza/cap8_Inzunza_Circulacion.pdf.
- IPCC, 2014. Glosario de términos del del IPCC. *GLOSARIO DE TÉRMINOS DEL IPCC ANEXO B*.
- IPCC, 2015. *Climate Change 2014: Synthesis report* [en línea]. Geneva: IPCC. Disponible en: <http://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>.
- JEFFREY, S., ROTSTAYN, L., COLLIER, M., DRAVITZKI, S., HAMALAINEN, C., MOESENEDER, C., WONG, K. y SYKTUS, J., 2013. Australia's CMIP5 submission using the CSIRO Mk3. 6 model. *Aust. Meteor. Oceanogr. J*, vol. 63, pp. 1-13.
- JIMÉNEZ GARCÍA, M., 2014. *Validación de la capacidad del modelo WRF "Weather Research and Forecasting" para pronosticar lluvia intensa, usando el método orientado a objetos y tablas de contingencia*. S.l.: Universidad Nacional de Colombia.
- KNUTTI, R. y SEDLÁČEK, J., 2013. Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections. *Nature Climate Change*, vol. 3, no. 4, pp. 369-373. ISSN 1758-678X.
- KÖPPEN, W., 1930. *Handbuch der klimatologie* [en línea]. S.l.: Gebrüder Borntraeger Berlin, Germany. [Consulta: 7 octubre 2017]. 1. Disponible en: http://www.naturaweb.net/pdf/Koppen_1936.pdf.
- MACKINNON, M.J. y PUTERMAN, M.L., 1989. Collinearity in generalized linear models. *Communications in Statistics - Theory and Methods*, vol. 18, no. 9, pp. 3463-3472. ISSN 0361-0926, 1532-415X. DOI 10.1080/03610928908830102.
- MARÍN, J., 2006. Tema 5: Análisis de Cluster y Multidimensional Scaling. ,
- MARTELO, M.T., 2003. c. *Dirección de Hidrología, Meteorología y Oceanología–Dirección General de Cuencas Hidrográficas–MARN.*[Consulta: 06-03-2015] Disponible en: http://www.inameh.gob.ve/documentos/precipitacion_venezuela_relacion_sistema%20climatico.pdf,
- MORA, D., CAMPOZANO, L., CISNEROS, F., WYSEURE, G. y WILLEMS, P., 2014. Climate changes of hydrometeorological and hydrological extremes in the Paute basin, Ecuadorean Andes. [en línea], [Consulta: 4 septiembre 2017]. DOI 10.5194/hess-18-631-2014. Disponible en: <http://dSPACE.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/22094>.
- MOYA, A. y ORTEGA, J., 2015. Aplicación del modelo meteorológico WRF para el pronóstico de precipitaciones en período lluvioso de Cuba, 2014. *Apuntes de Ciencia & Sociedad* [en línea], vol. 5, no. 1. [Consulta: 4 septiembre 2017]. ISSN 2225-515X. DOI 10.18259/acs.2015021. Disponible en: <http://journals.continental.edu.pe/index.php/apuntes/article/view/309>.



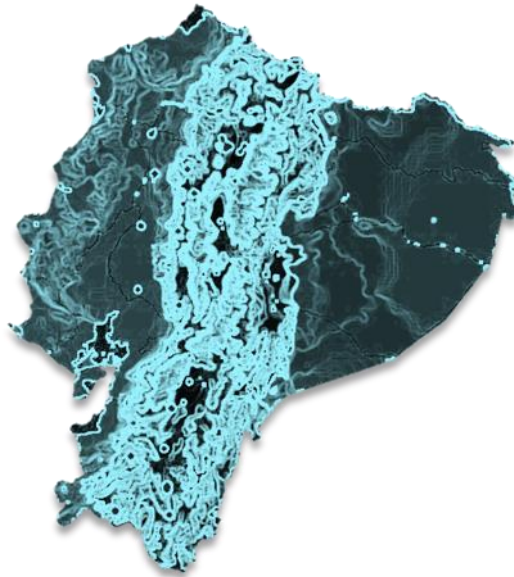
- OCHOA, A., CAMPOZANO, L., SÁNCHEZ, E., GUALÁN, R. y SAMANIEGO, E., 2016. Evaluation of downscaled estimates of monthly temperature and precipitation for a Southern Ecuador case study. *International Journal of Climatology*, vol. 36, no. 3, pp. 1244-1255. ISSN 1097-0088. DOI 10.1002/joc.4418.
- OVIEDO, B., 2010. Generación de escenarios de cambio climático regionales y locales a partir de modelos globales-guía para tomadores de decisiones. Nota Técnica IDEAM. [en línea]. S.l.: IDEAMMETEO/050-2010, Bogotá DC. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Guía+Escenarios+para+Tomadores+de+Decisiones.pdf/fa7abe38-43cc-49c8-96a3-f2b5c24ecce3>.
- POUYAUD, B., 1995. *El agua en el Ecuador : clima, precipitaciones, escorrentía* [en línea]. Quito: Corporacion Editora Nacional. [Consulta: 5 septiembre 2017]. Estudios de Geografía, 7. Disponible en: <http://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:010014823>. Centre IRD de Bondy
- POUYAUD, B., FRANCOU, B., RIBSTEIN, P. y SEMINARIO INTERNACIONAL AGUAS, GLACIARES Y CAMBIOS CLIMATICOS EN LOS ANDES TROPICALES, LA PAZ (BOL), 1995/06/13-16, 1995. La red de monitoreo glacio-hidrológico de ORSTOM y de sus contrapartes en Bolivia, Peru y Ecuador : une herramienta para el estudio del recalentamiento global y de sus consecuencias en los trópicos. En: P. RIBSTEIN y B. FRANCOU (eds.), *Aguas, glaciares y cambios climáticos en los Andes tropicales : conferencias y posters* [en línea]. La Paz: ORSTOM, pp. 229-238 multigr. [Consulta: 15 septiembre 2017]. Disponible en: <http://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:010028332>. Centre IRD de Bondy
- QUESTIONNAIRE, M., 2015. CMIP5 Model : IPSL - IPSL-CM5A-MR. *Earth System Documentation* [en línea]. Disponible en: <https://view.es-doc.org/?renderMethod=name&type=cim.1.software.ModelComponent&name=IPSL-CM5A-MR&project=CMIP5>.
- 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. [en línea]. climatico. Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. DEAM-METEO/009-2010 PRELIMINAR DEL IDEAM. Disponible en: <http://modelos.ideam.gov.co/media/dynamic/escenarios/evaluacion-de-modelos-globales-ipcc.pdf>.
- RUEDA, V.O.M. y GARCÍA, C.G., 2002. Vulnerabilidad y adaptación regional ante el cambio climático y sus impactos ambientales, sociales y económicos. *Gaceta Ecológica*, no. 65, pp. 7-23. ISSN 1405-2849,.
- SANTIAGO, 2007. Geografía de Ecuador: generalidades. *La guía* [en línea]. Disponible en: <https://geografia.laguia2000.com/geografia-regional/america/geografia-ecuador-generalidades>.



- TAYLOR, E., STOUFFER, J. y MEEHL, G., 2012. An overview of CMIP5 and the experiment design. [en línea], Disponible en: <http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>.
- TAYLOR, K.E., 2001. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *NO. D7*, vol. 106, pp. 7183–7192,.
- TAYLOR, K.E., 2005. *Taylor Diagram Primer* [en línea]. 2005. S.l.: s.n. Disponible en: http://www-pcmdi.llnl.gov/about/staff/Taylor/CV/Taylor_diagram_primer.pdf.
- UREÑA, P., MARTÍNEZ, A., J. E., ALFARO, S. y JAVIER, F., 2016. Propuestas metodológicas para el rellenado de datos ausentes en series de tiempo geofísicas. Guía Práctica de uso. [en línea], [Consulta: 9 octubre 2017]. Disponible en: <http://www.kerwa.ucr.ac.cr/handle/10669/28888>.
- VUILLE, M., FRANCOU, B., WAGNON, P., JUEN, I., KASER, G., MARK, B.G. y BRADLEY, R.S., 2008. Climate change and tropical Andean glaciers: Past, present and future. *Earth-science reviews*, vol. 89, no. 3, pp. 79-96. ISSN 0012-8252.
- WANG, X. y FENG, Y., 2010. RHtestsV4 User Manual, 2013. ,
- WIKIPEDIA, 2017. Geografía del Ecuador. *Wikipedia* [en línea]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Geografía_de_Ecuador.



ANEXOS

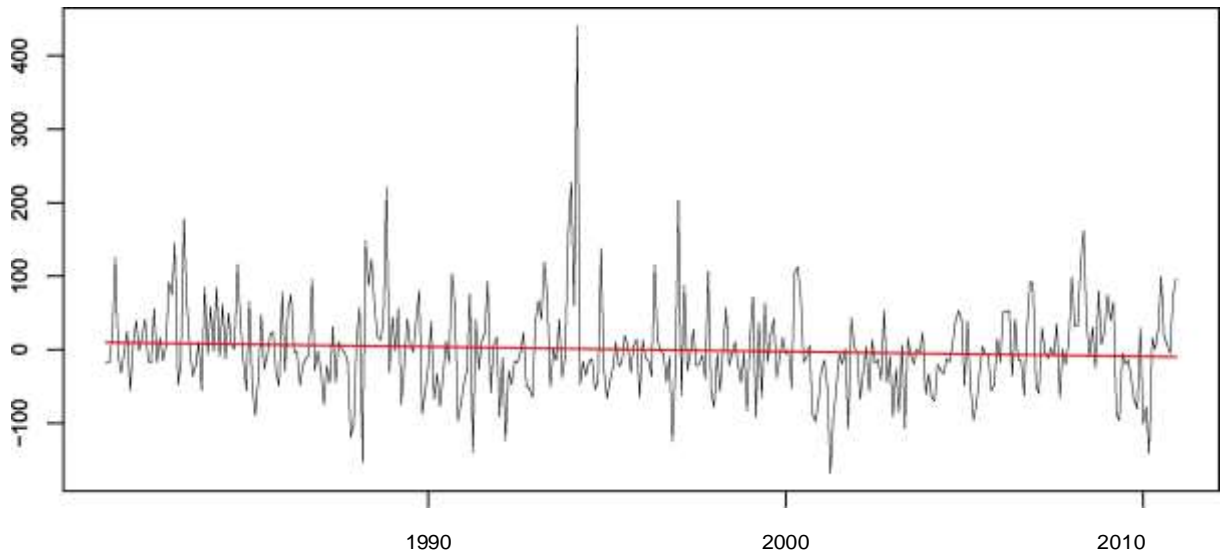


ANEXOS

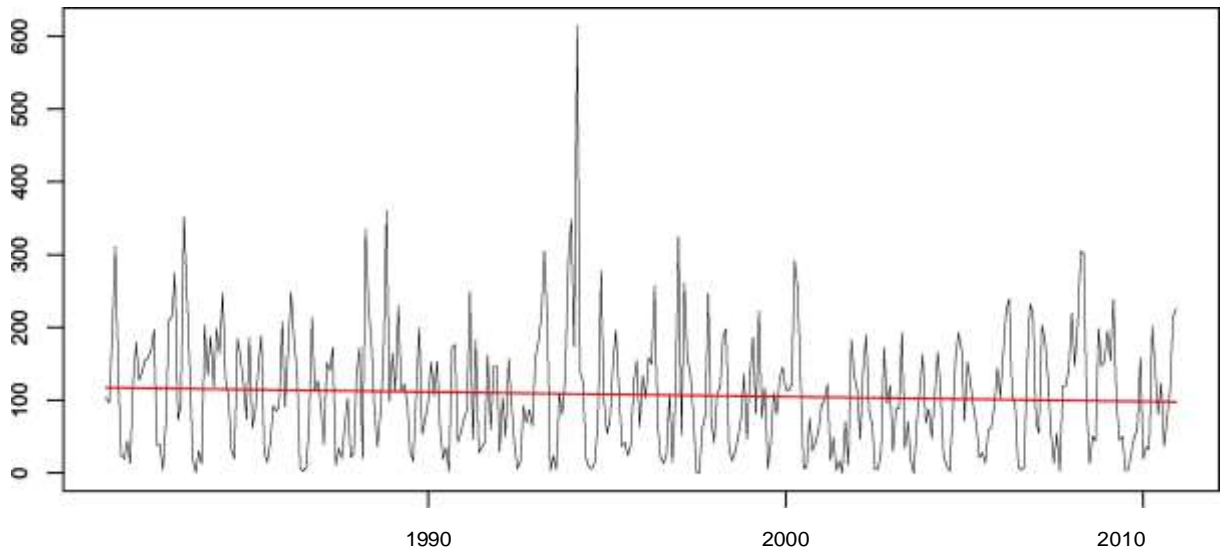
GRÁFICOS DE HOMOGENEIDAD

M0001 INGUINCHO

Base anomaly series and regression fit

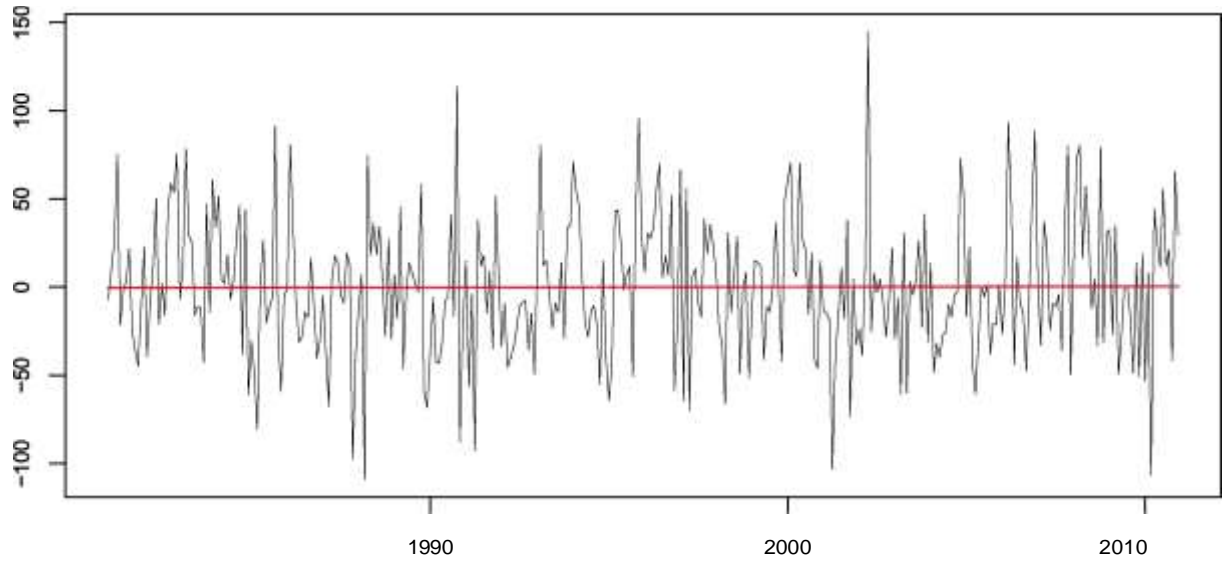


Base series and regression fit

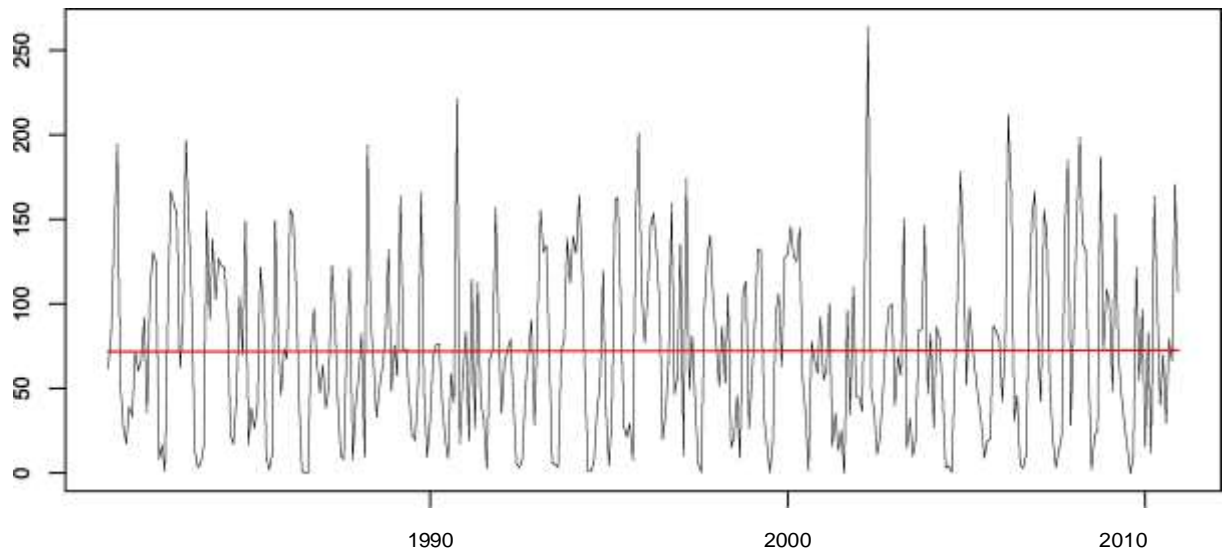


M0002 LA TOLA

Base anomaly series and regression fit

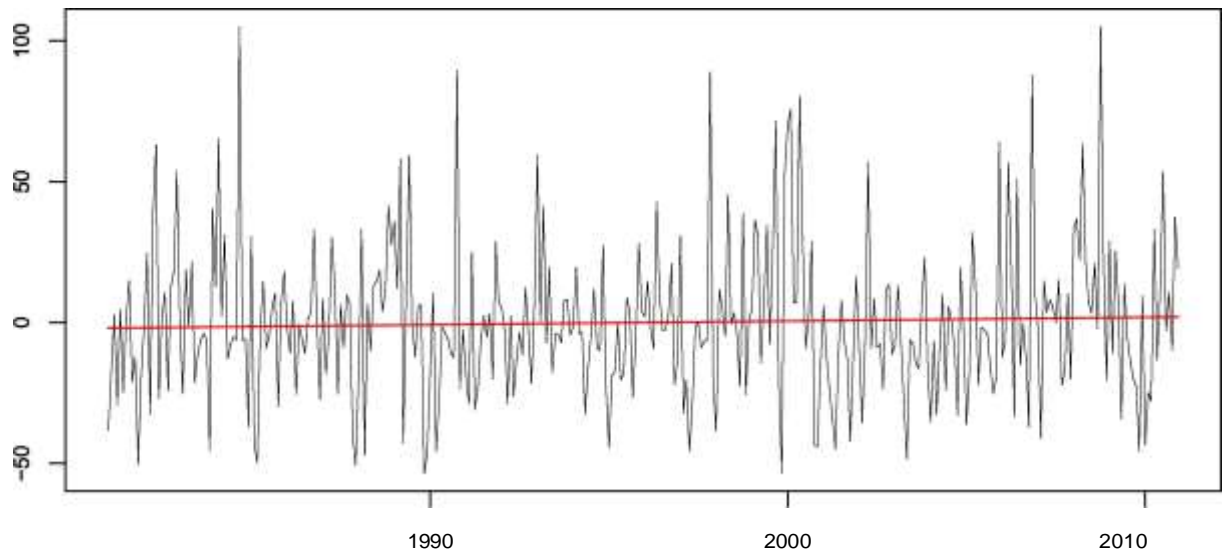


Base series and regression fit

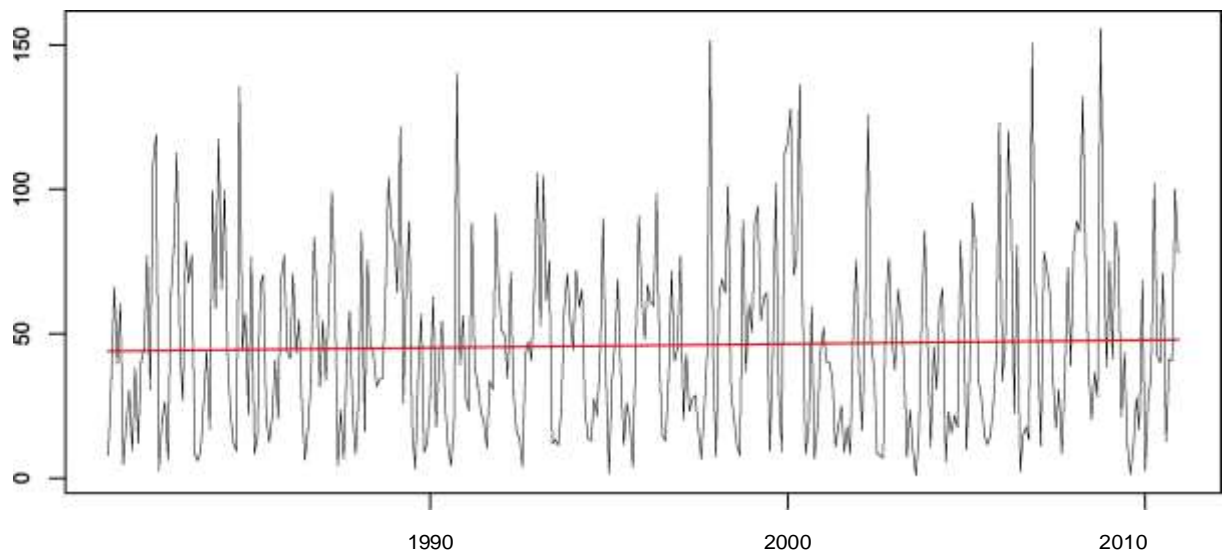


M0004 RUMIPAMBA-SALSED

Base anomaly series and regression fit

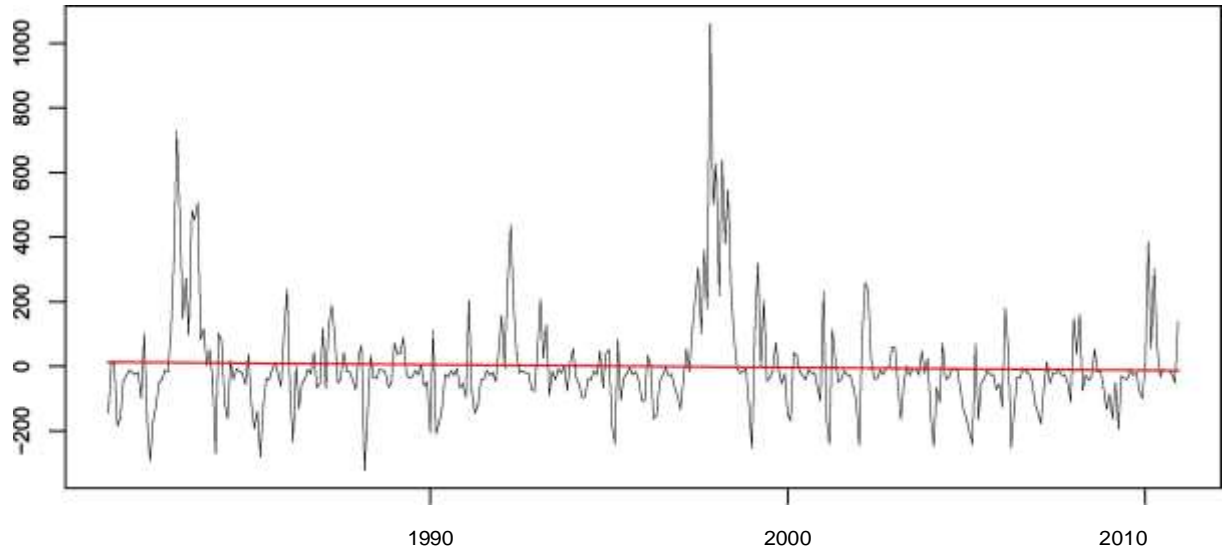


Base series and regression fit

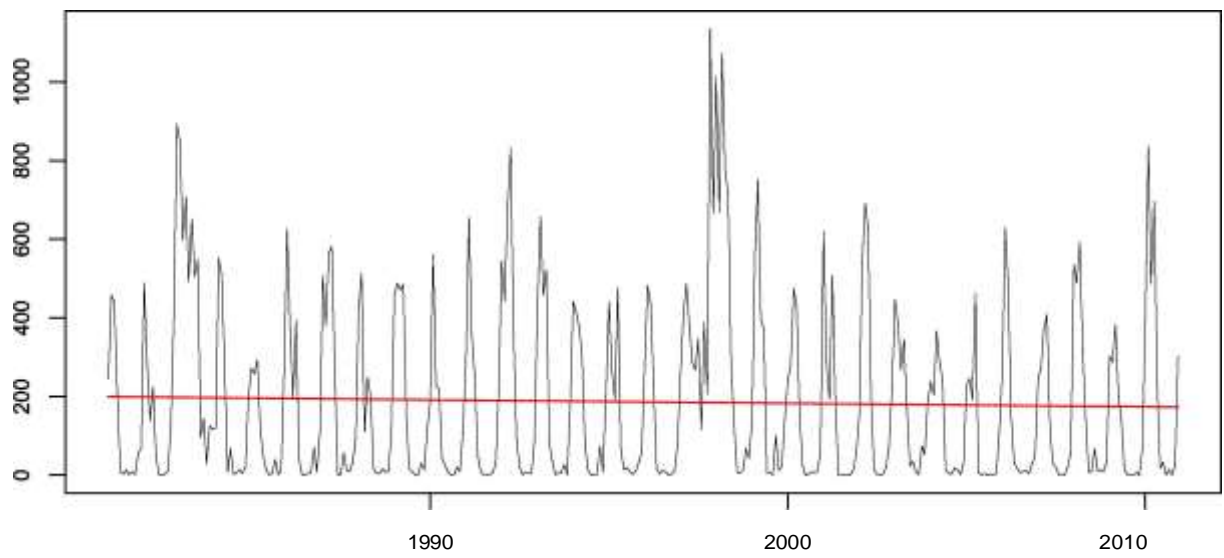


M0006 PICHINLINGUE

Base anomaly series and regression fit

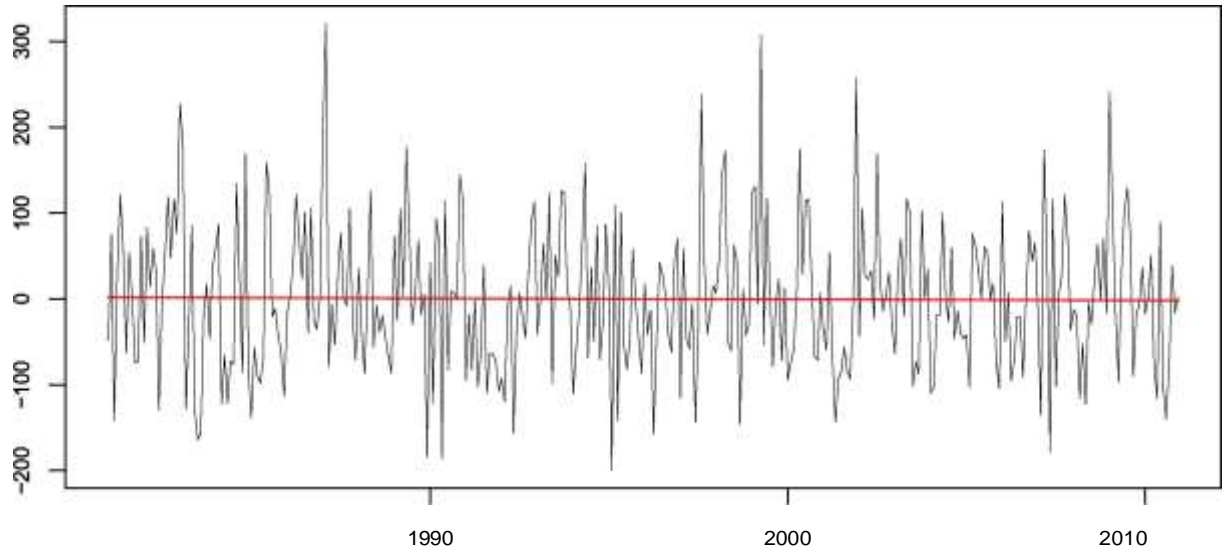


Base series and regression fit

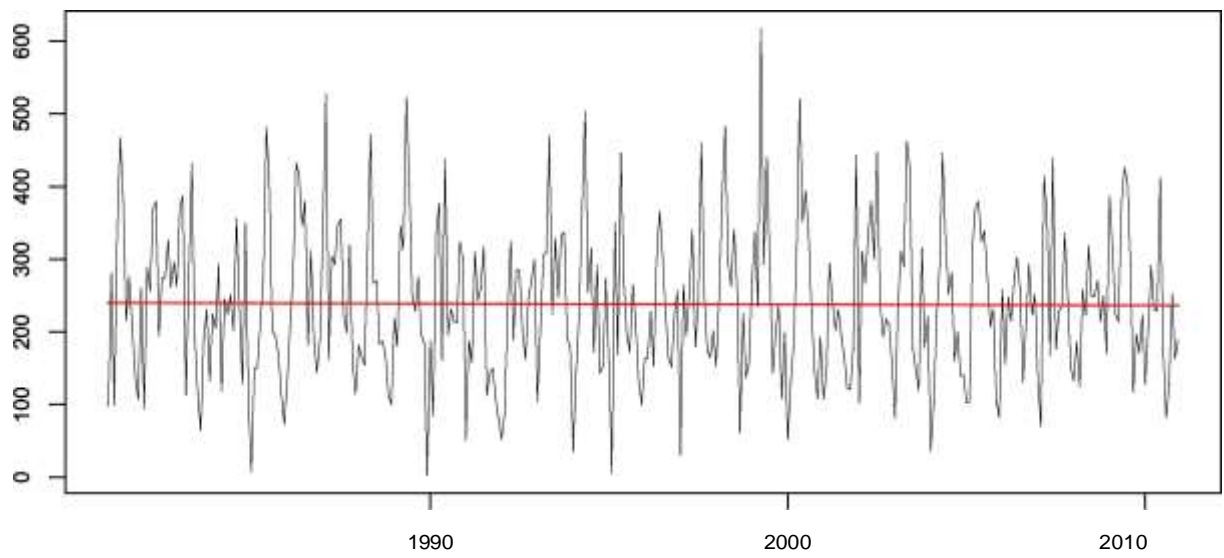


M0007 NUEVA ROCAFUERTE

Base anomaly series and regression fit

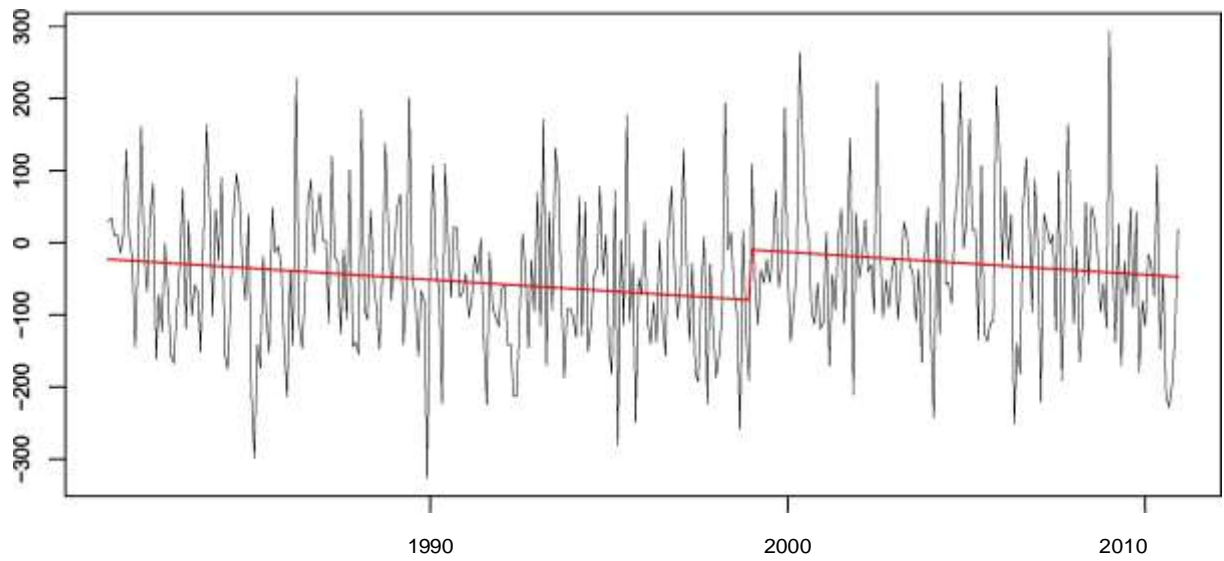


Base series and regression fit

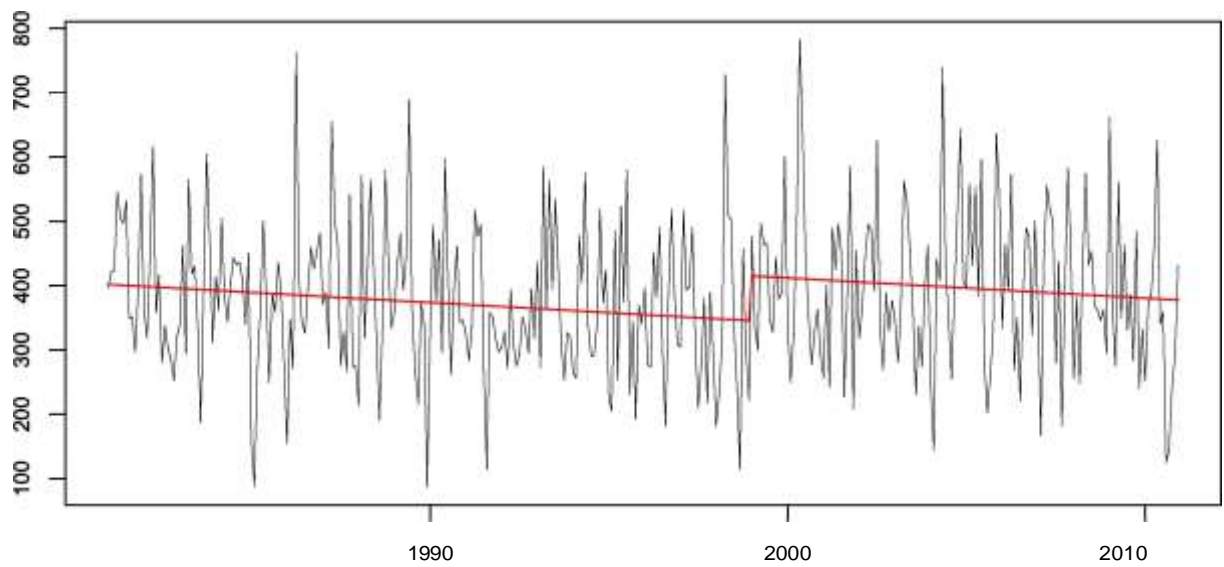


M0008 PUYO

Base anomaly series and regression fit

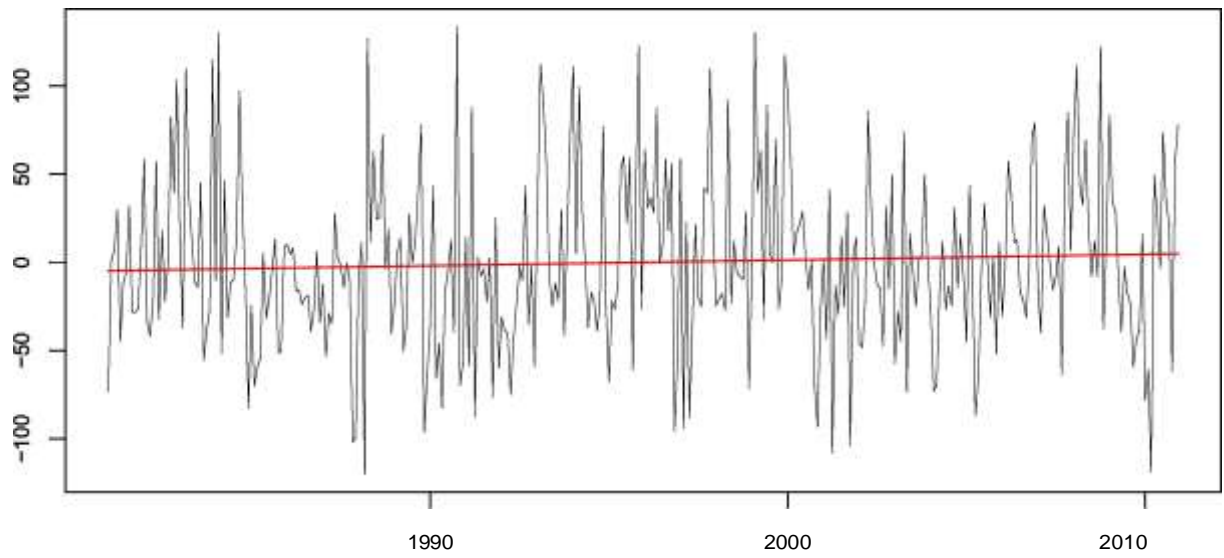


Base series and regression fit

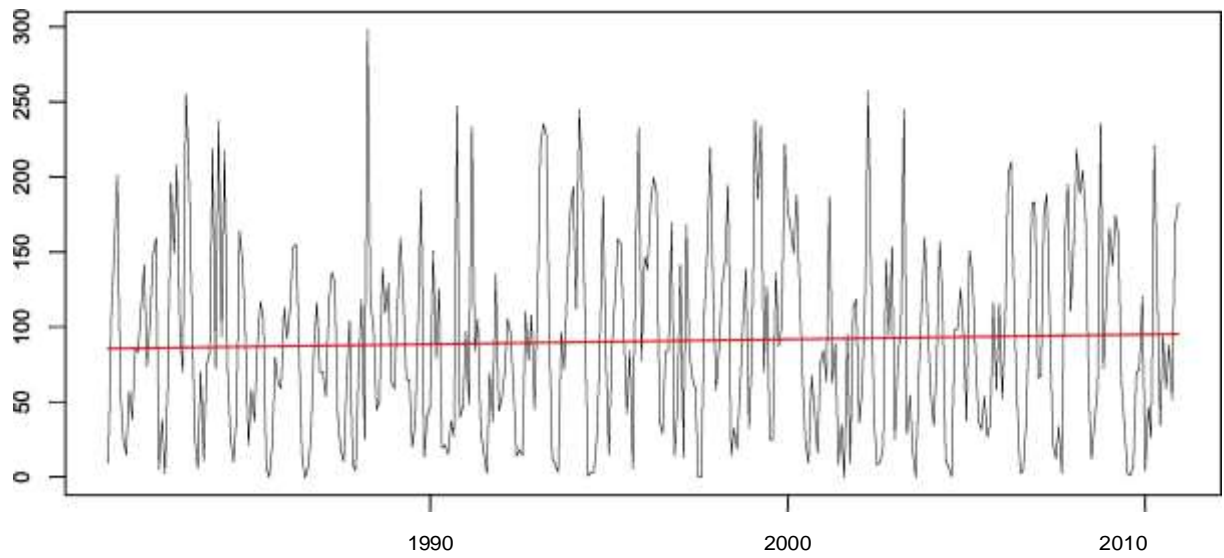


M0024 QUITO INAMHI

Base anomaly series and regression fit

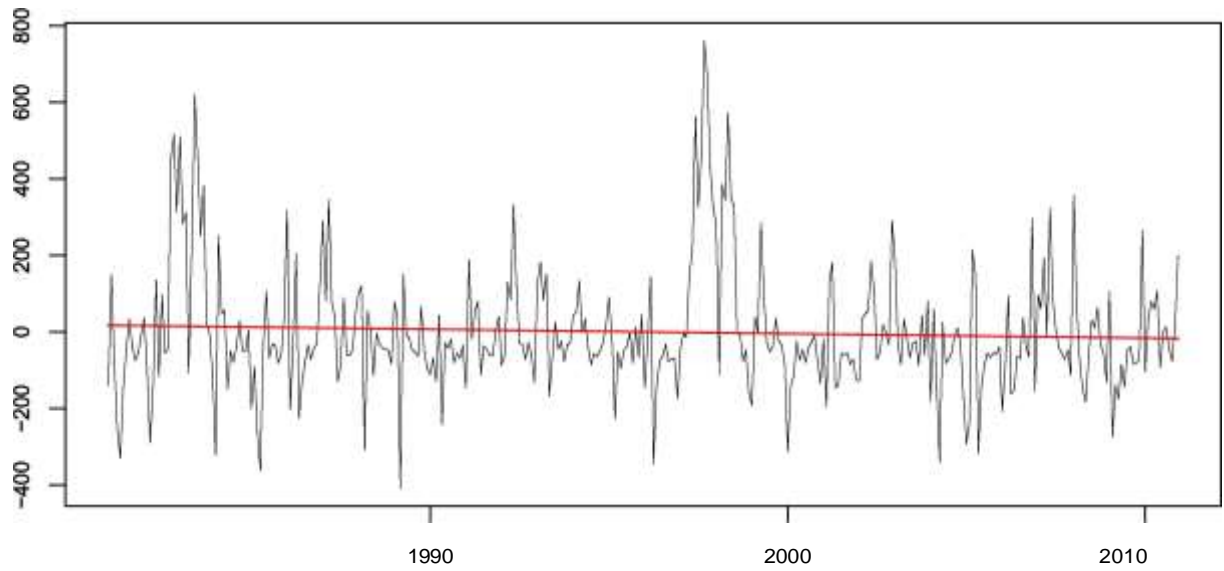


Base series and regression fit

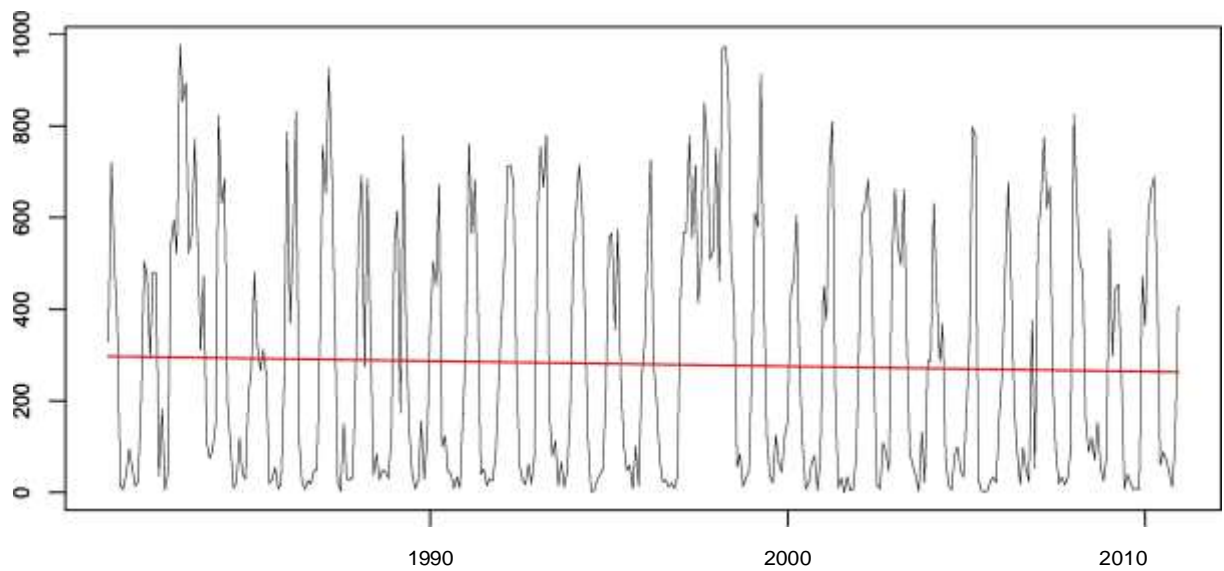


M0025 LA CONCORDIA

Base anomaly series and regression fit

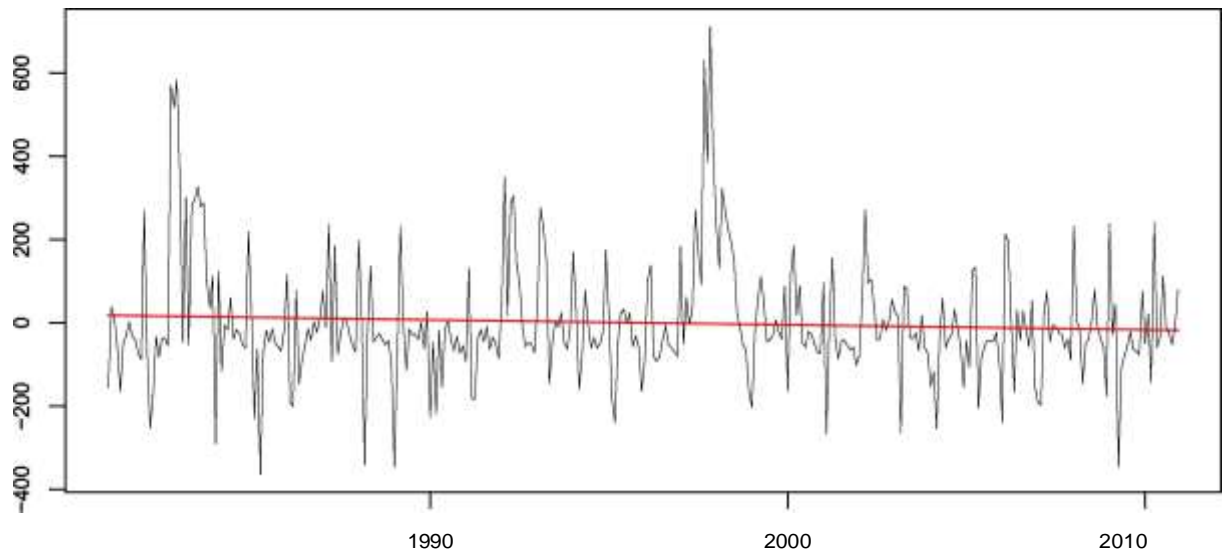


Base series and regression fit

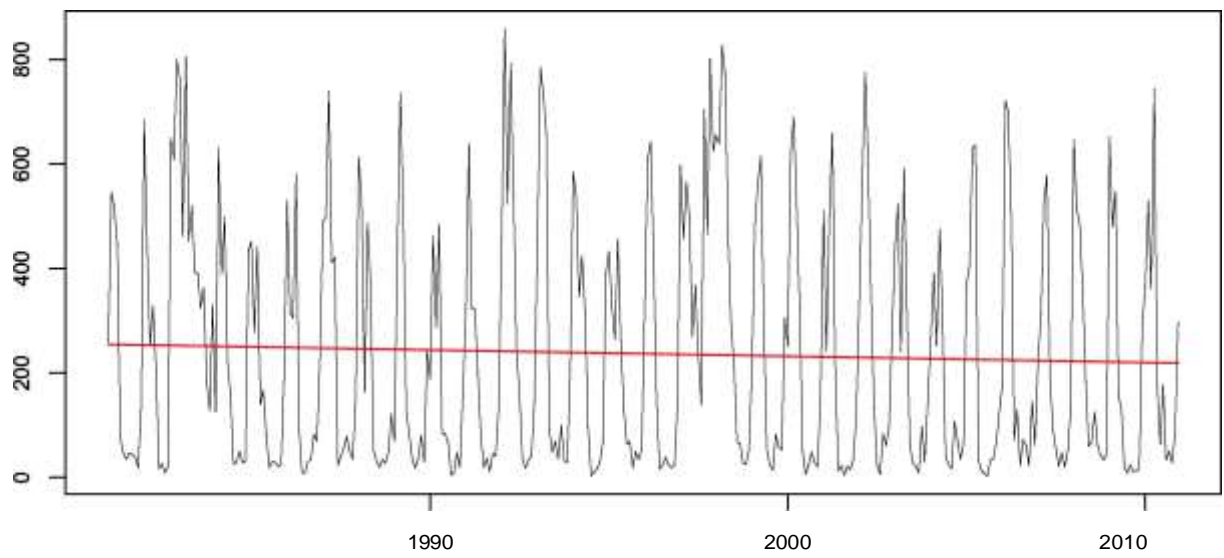


M0026 PUERTO OLLA

Base anomaly series and regression fit

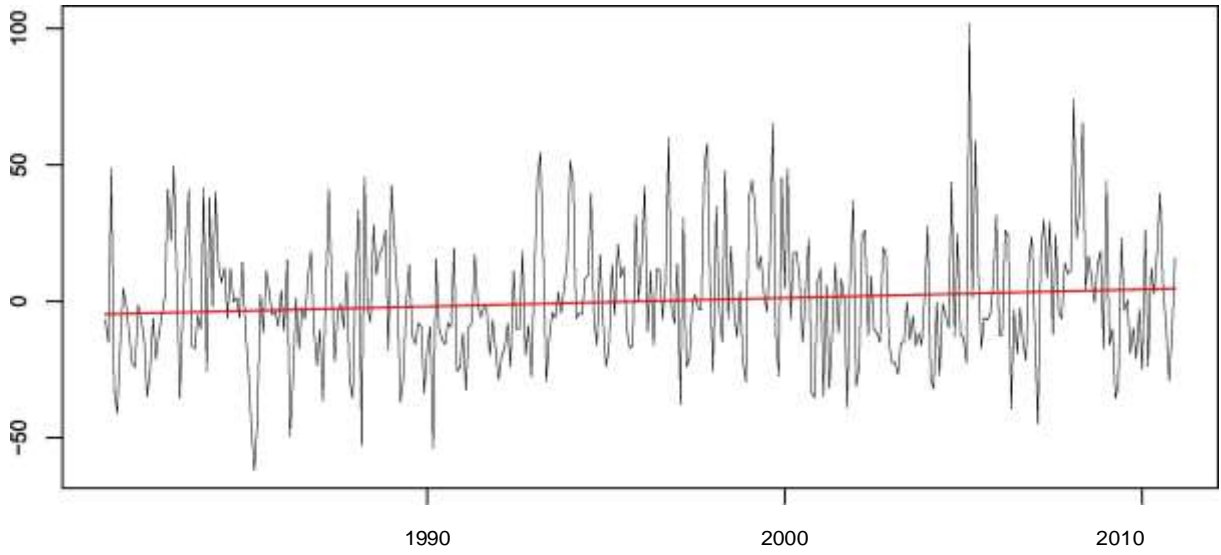


Base series and regression fit

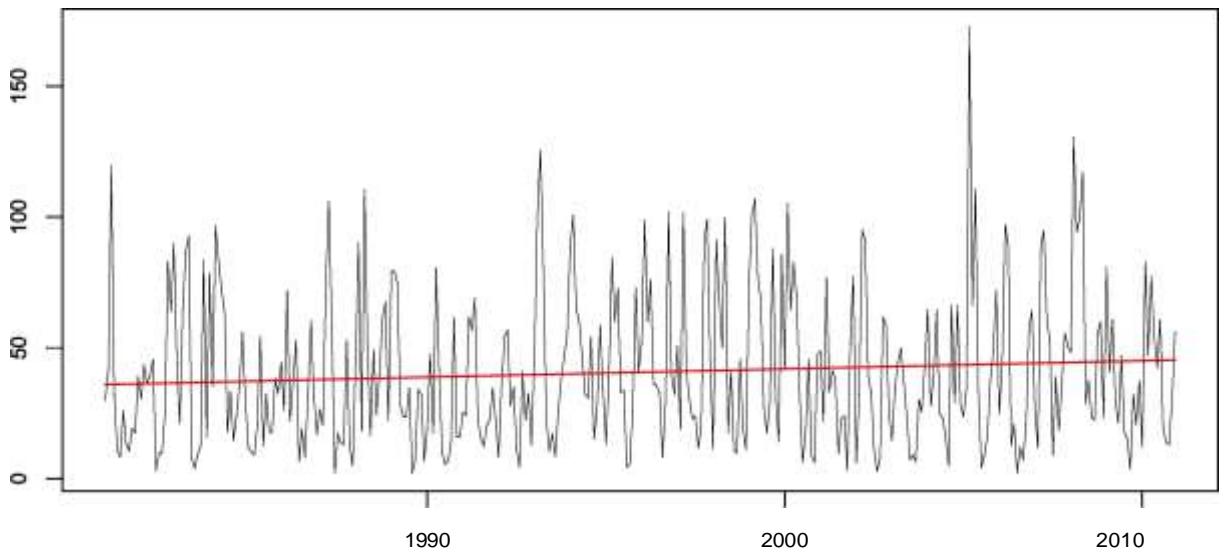


M0031 CAñAR

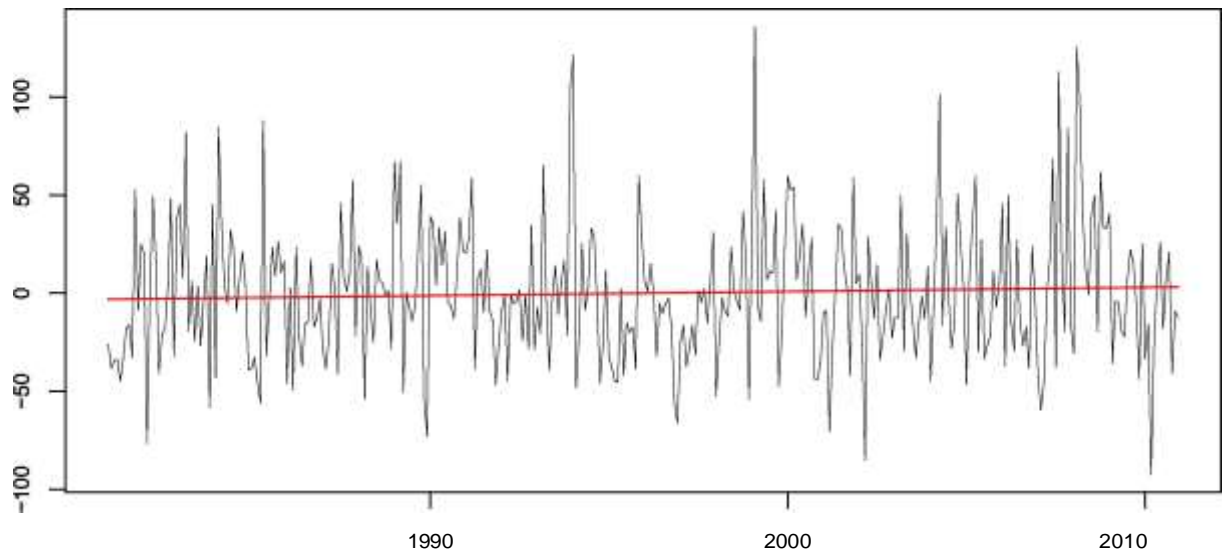
Base anomaly series and regression fit



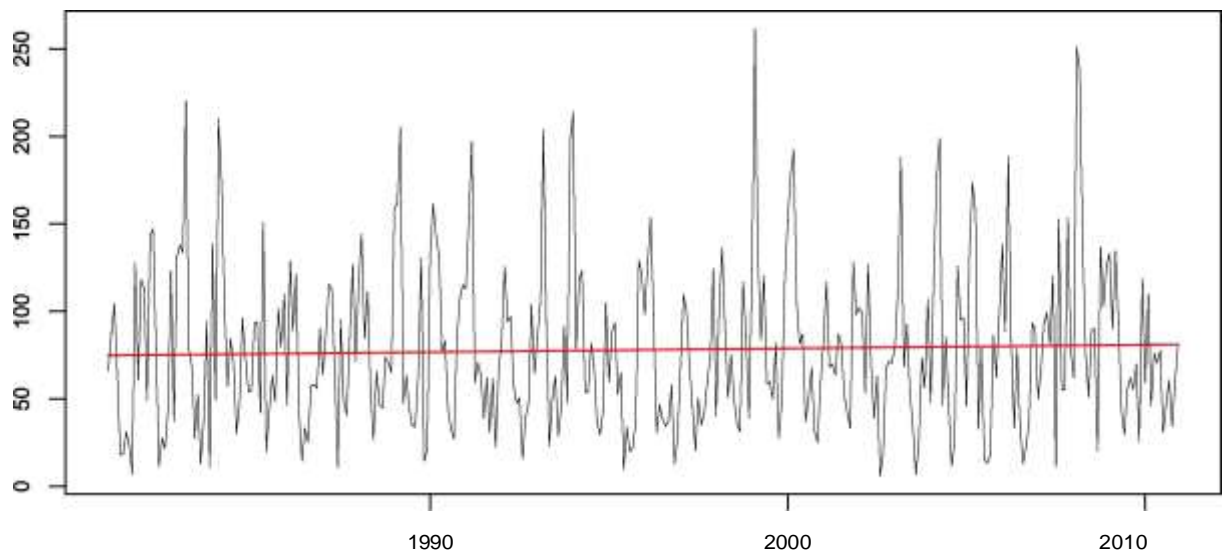
Base series and regression fit



Base anomaly series and regression fit

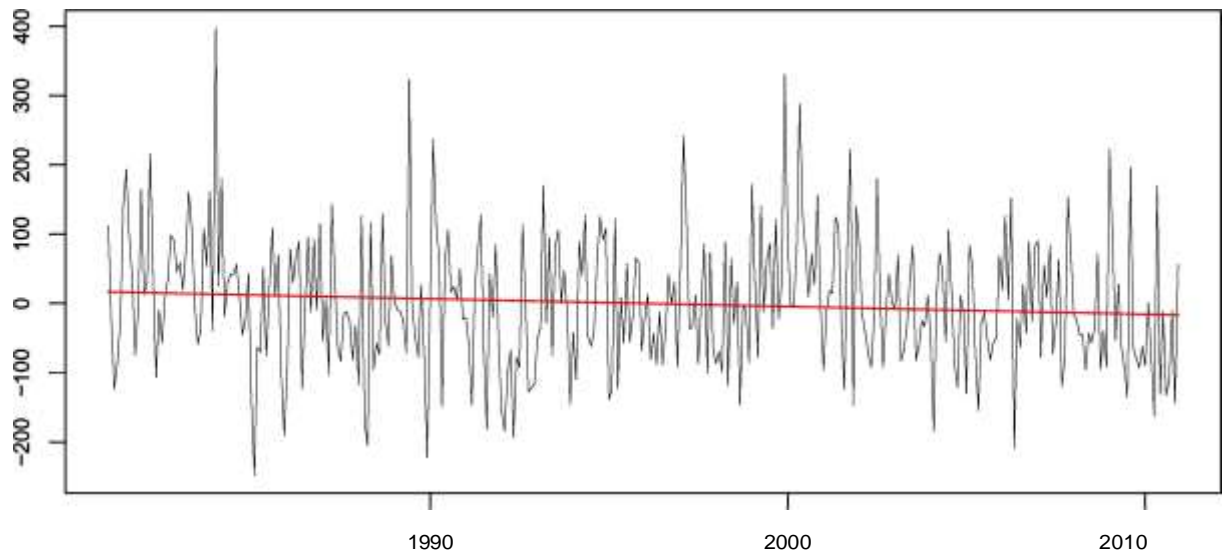


Base series and regression fit

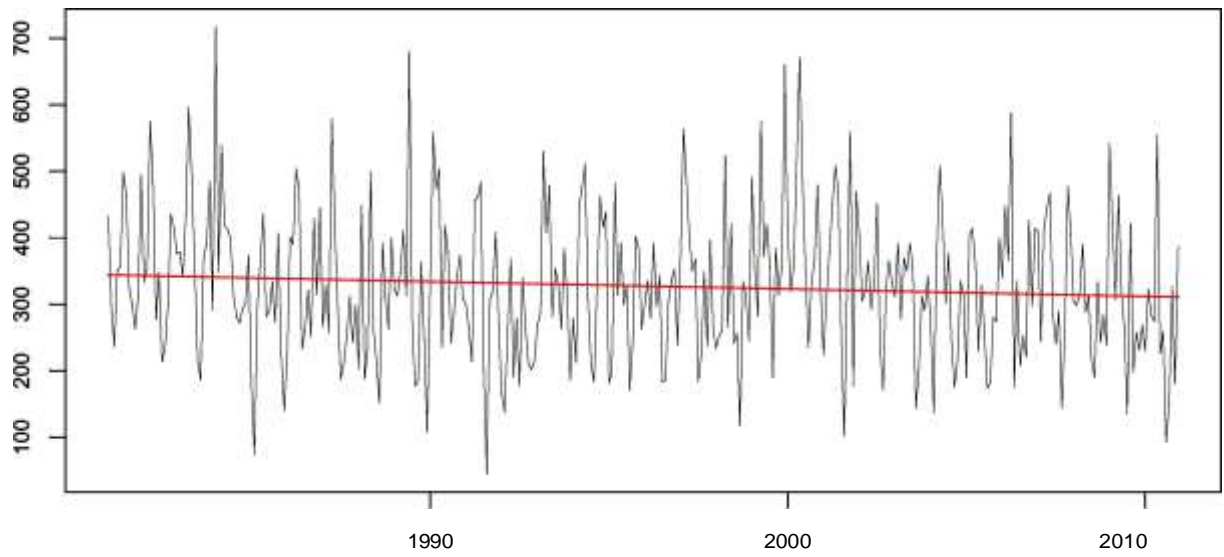


M0041 SANGAY

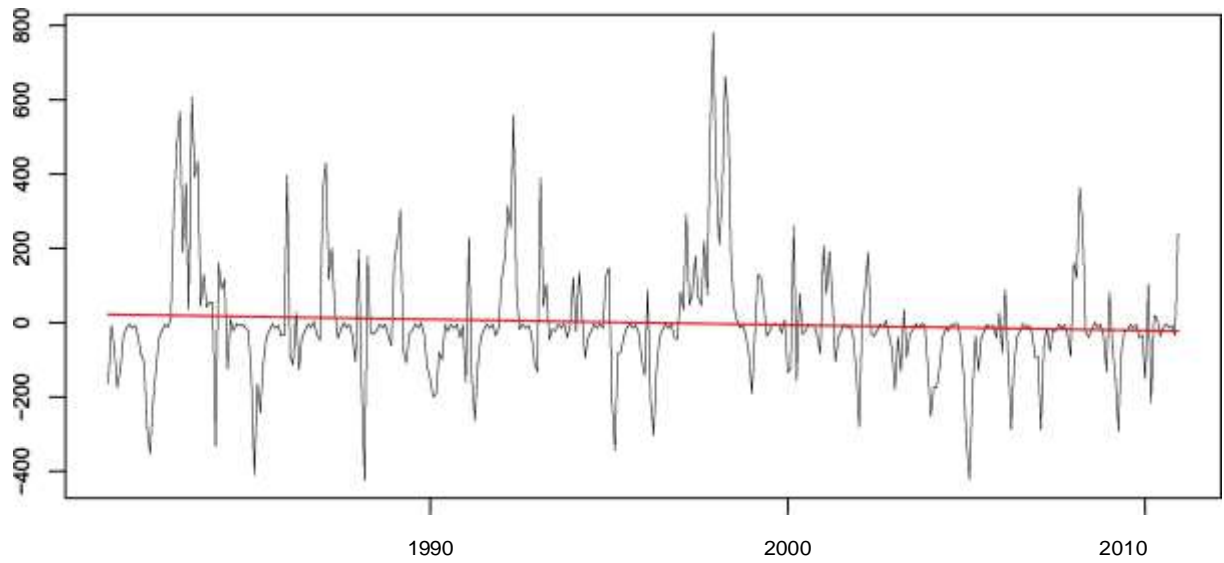
Base anomaly series and regression fit



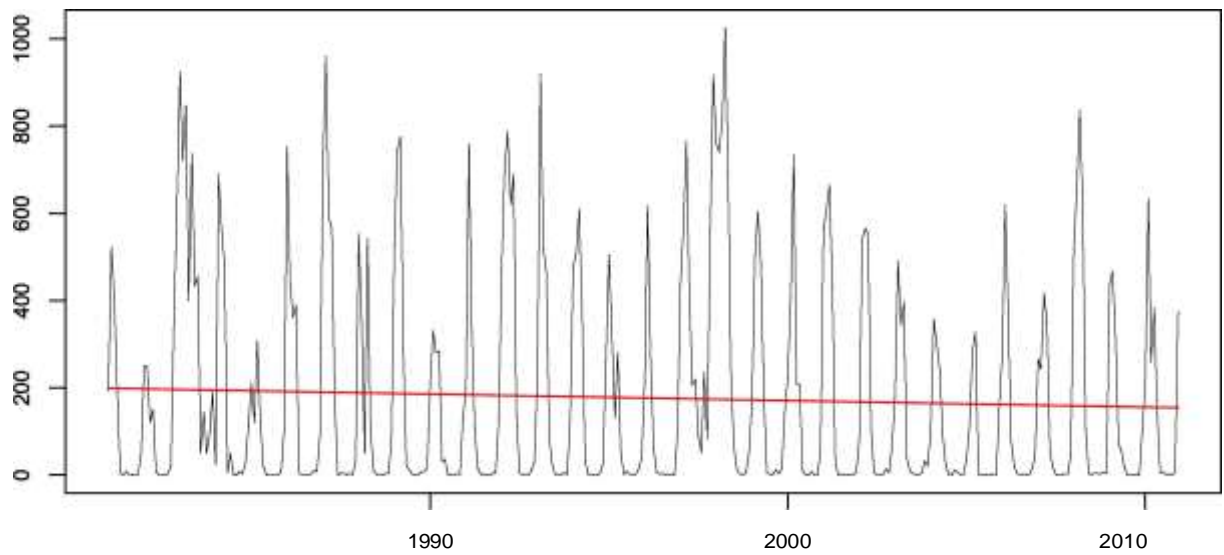
Base series and regression fit



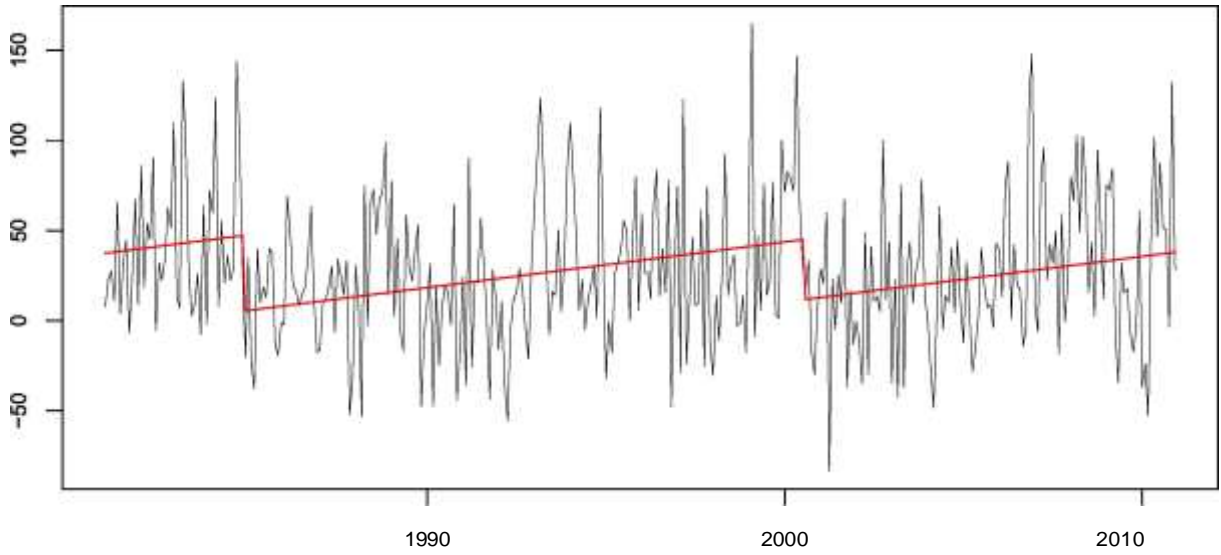
Base anomaly series and regression fit



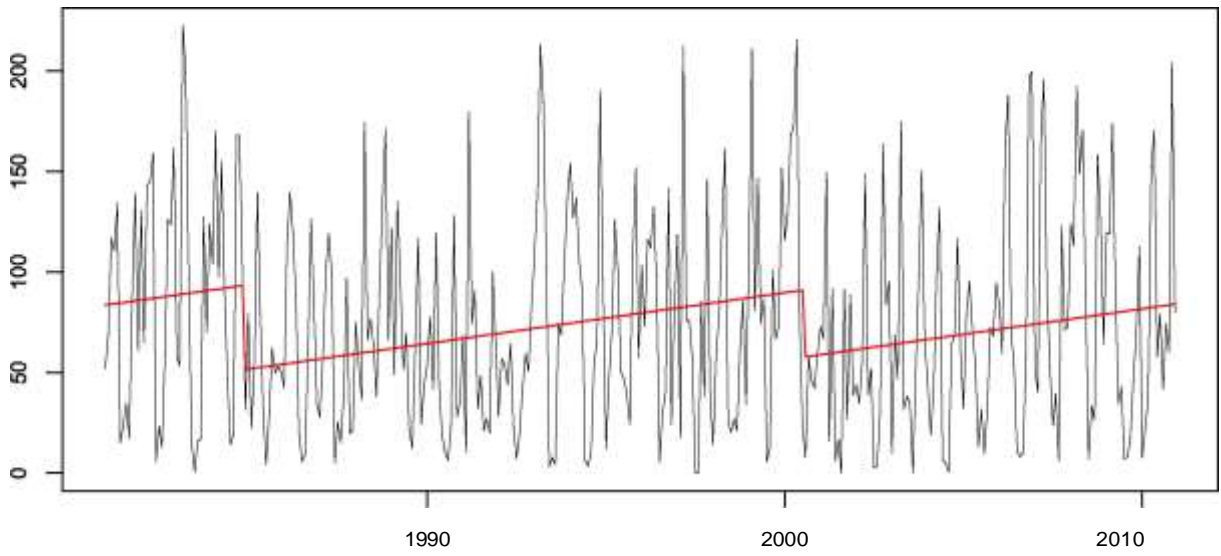
Base series and regression fit



Base anomaly series and regression fit

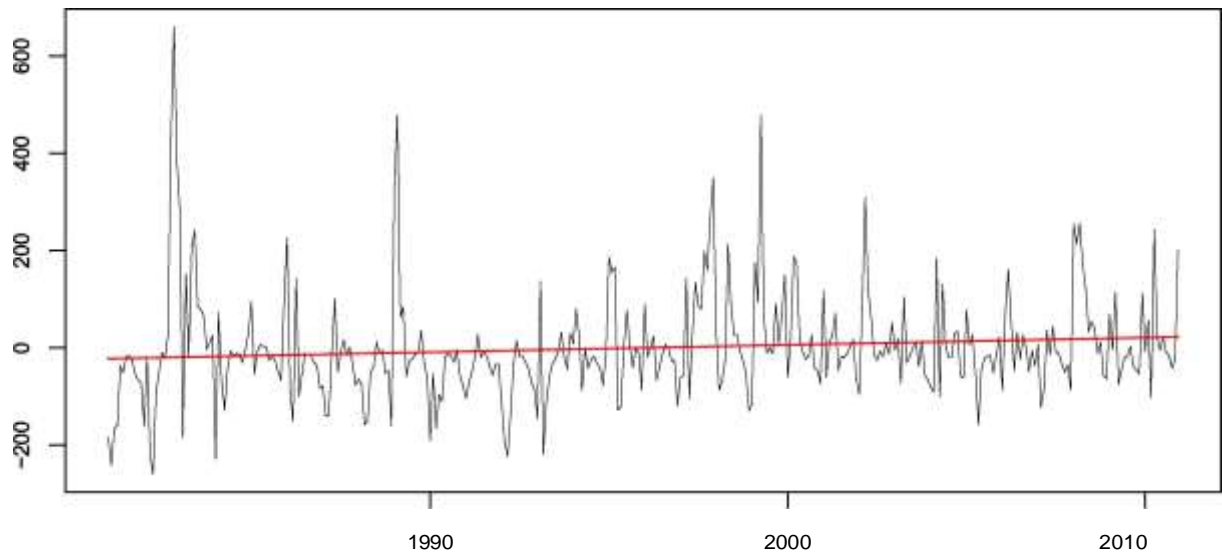


Base series and regression fit

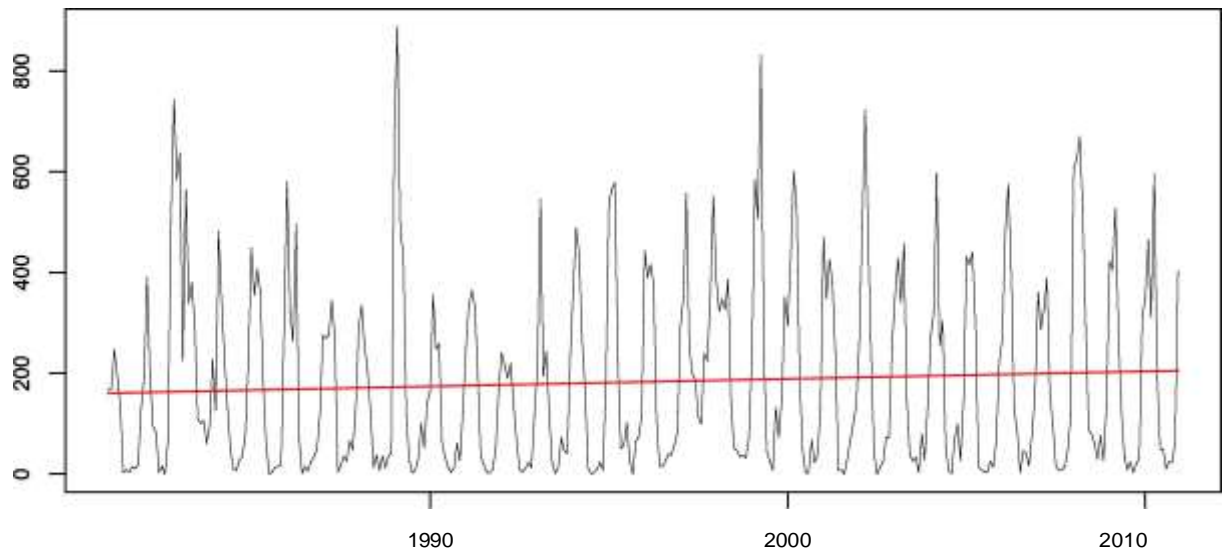


M0123 EL CORAZON

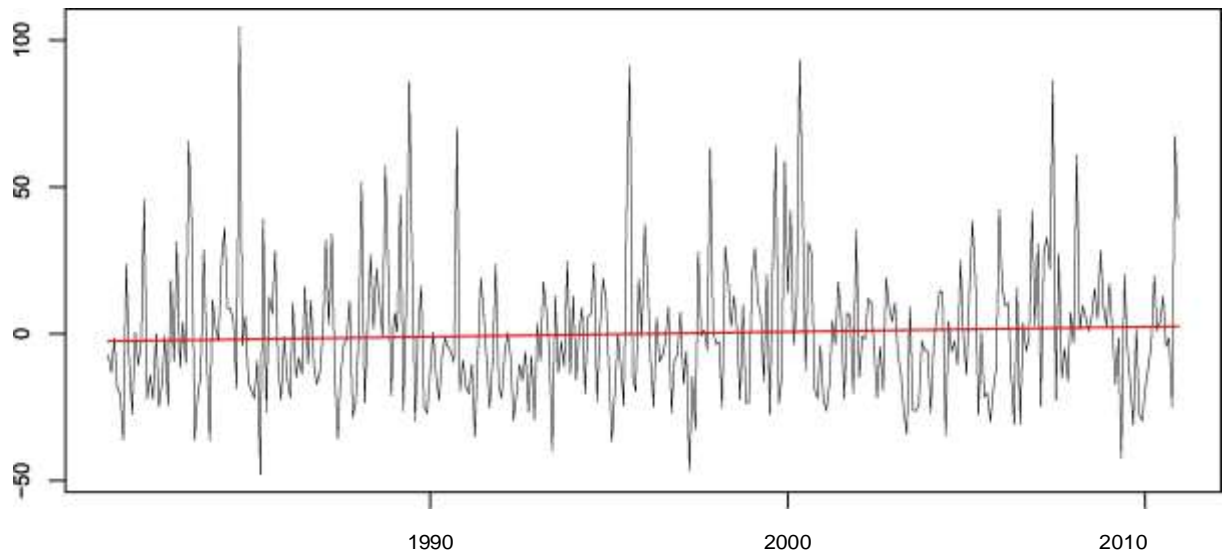
Base anomaly series and regression fit



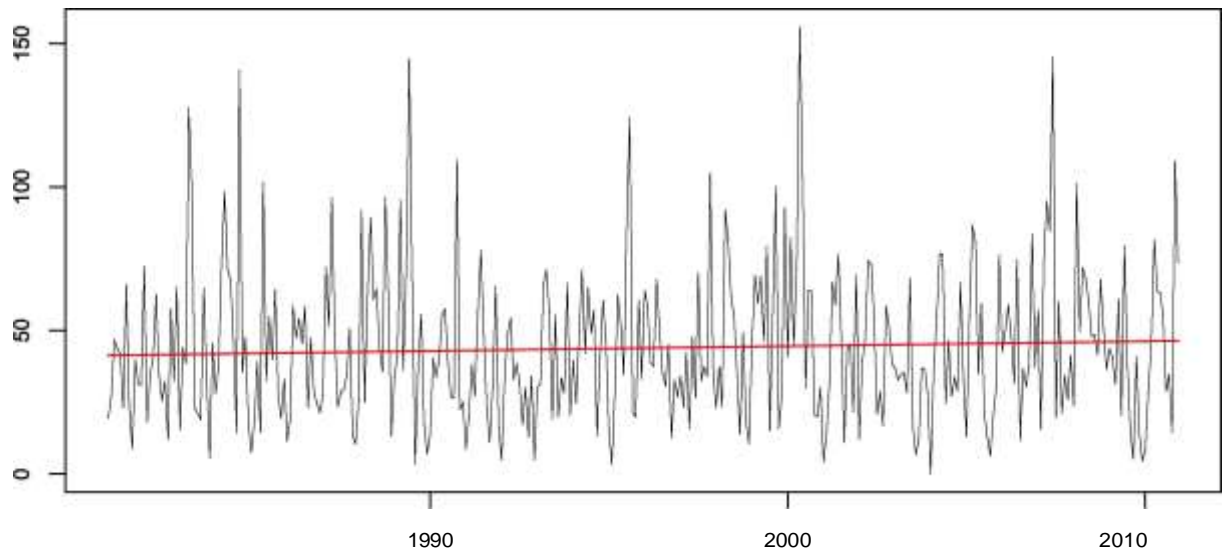
Base series and regression fit



Base anomaly series and regression fit

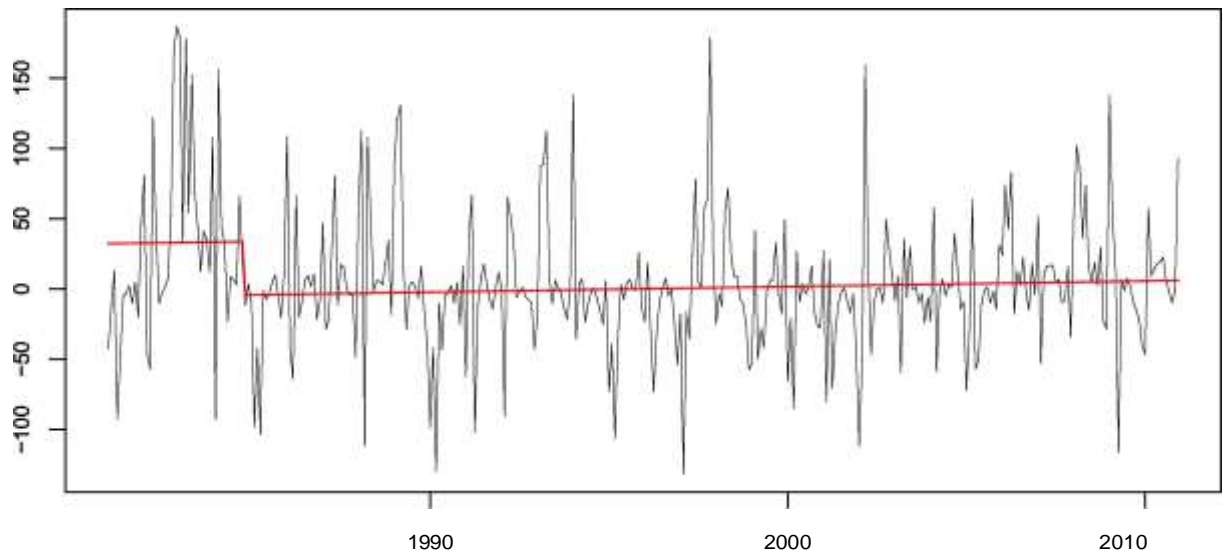


Base series and regression fit

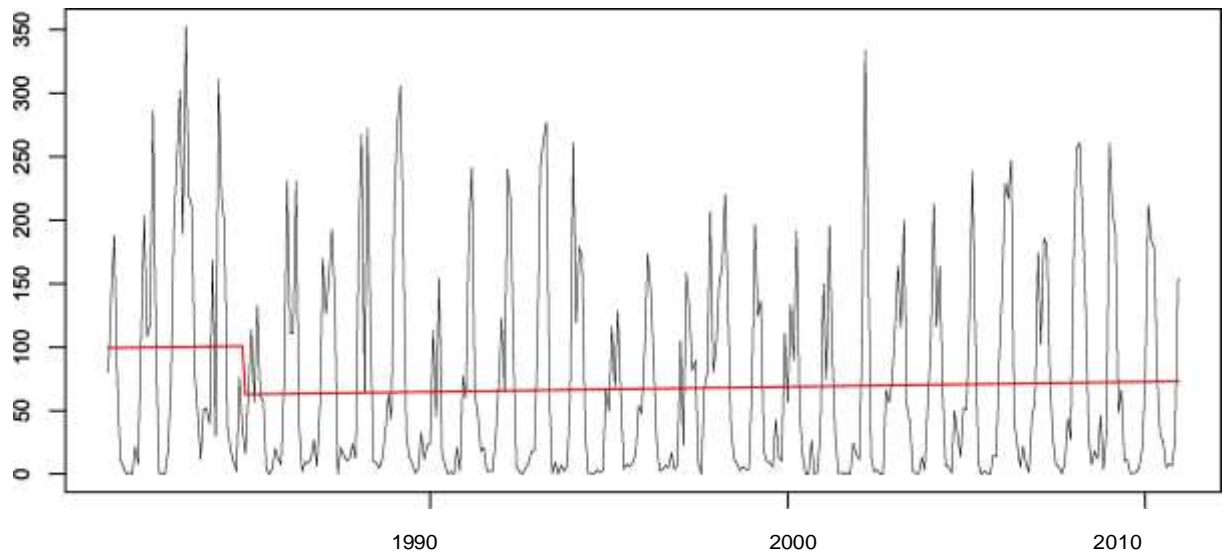


M0130 CHILLANES

Base anomaly series and regression fit

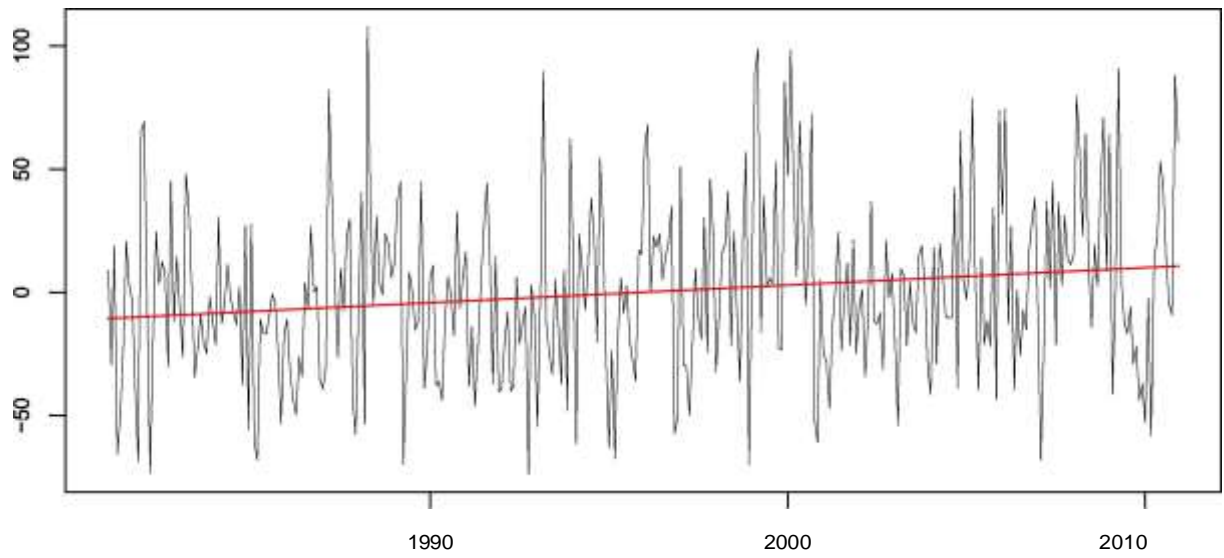


Base series and regression fit

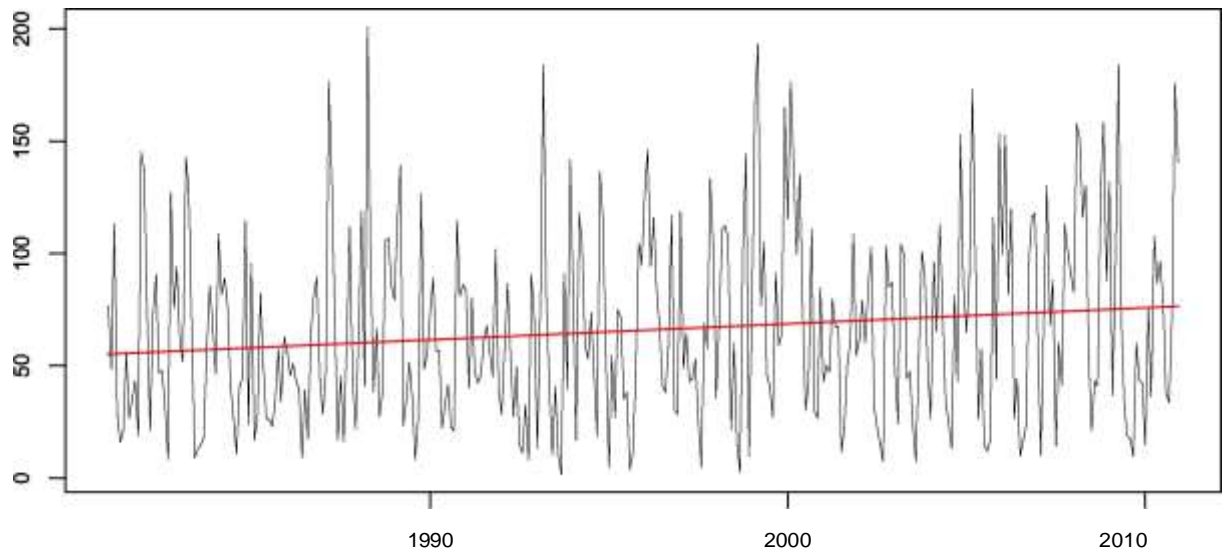


M0139 GUALACEO

Base anomaly series and regression fit

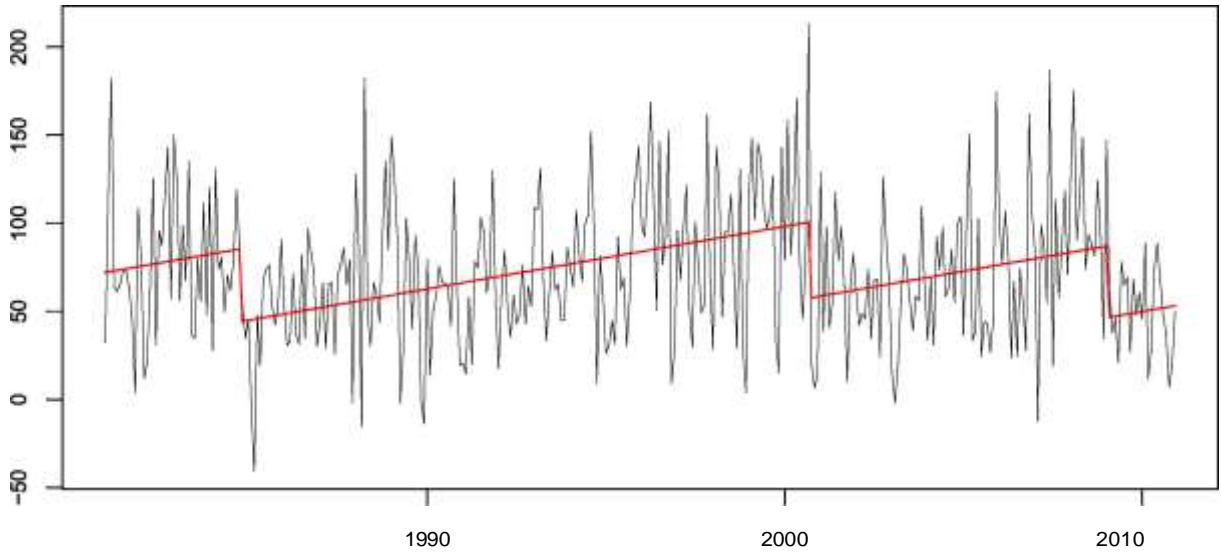


Base series and regression fit

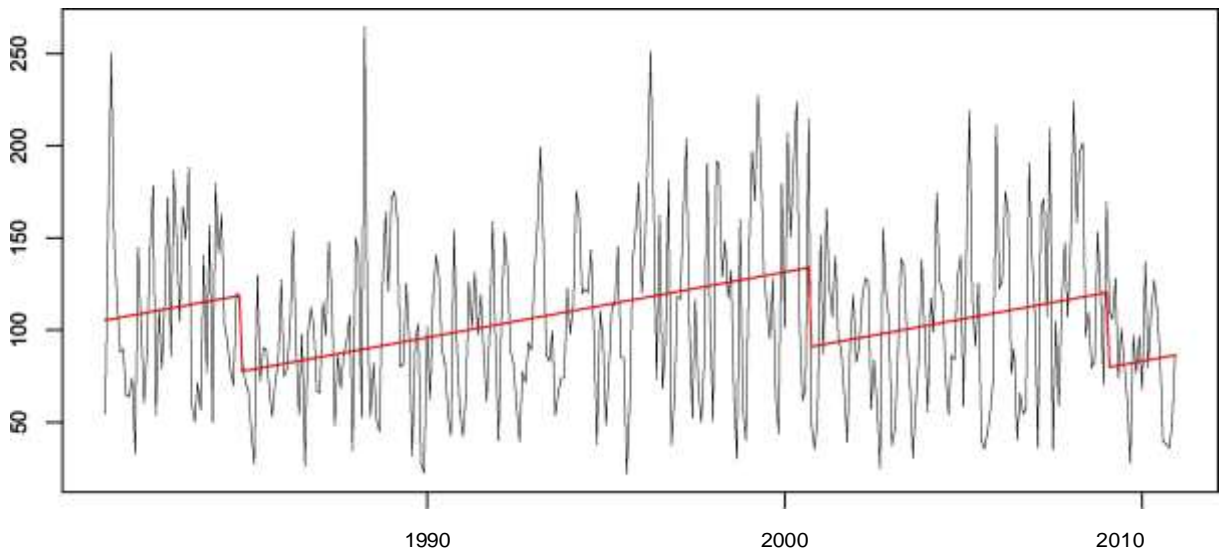


M0141 LABRADO

Base anomaly series and regression fit

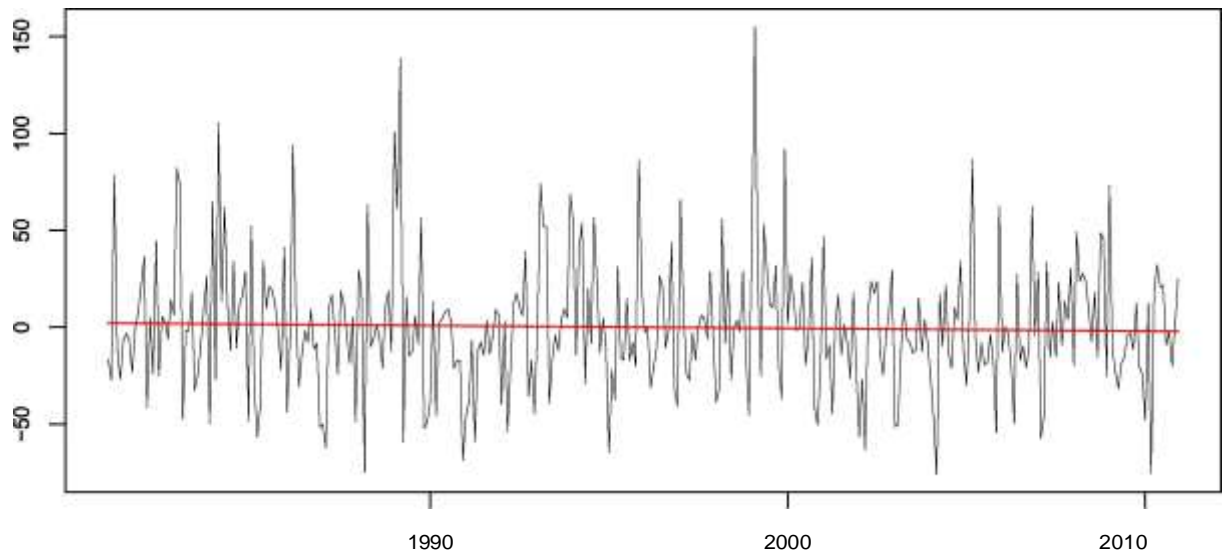


Base series and regression fit

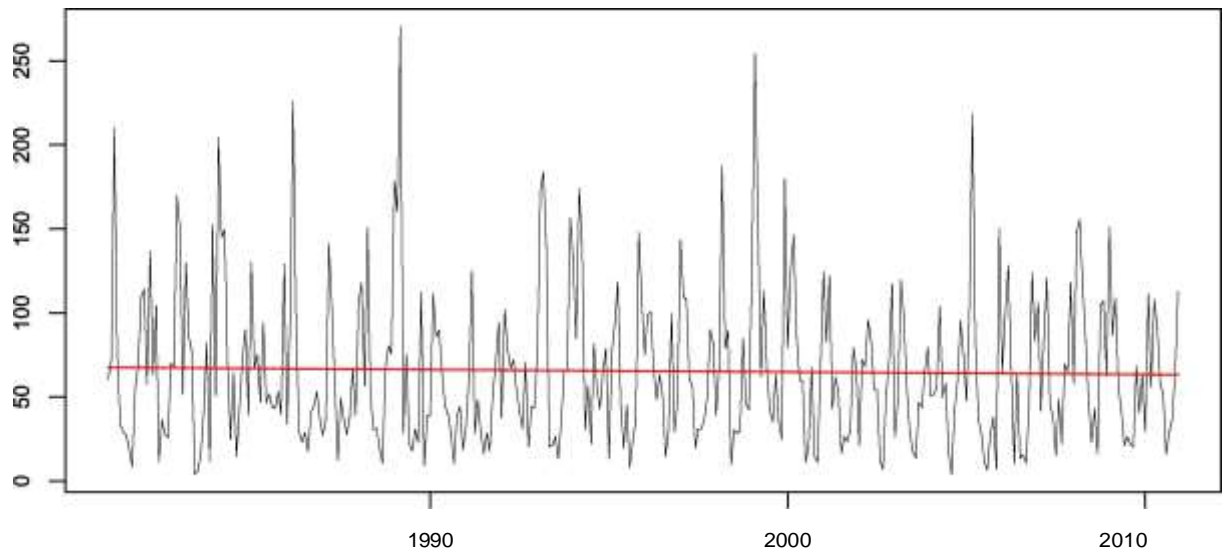


M0142 SARAGURO

Base anomaly series and regression fit

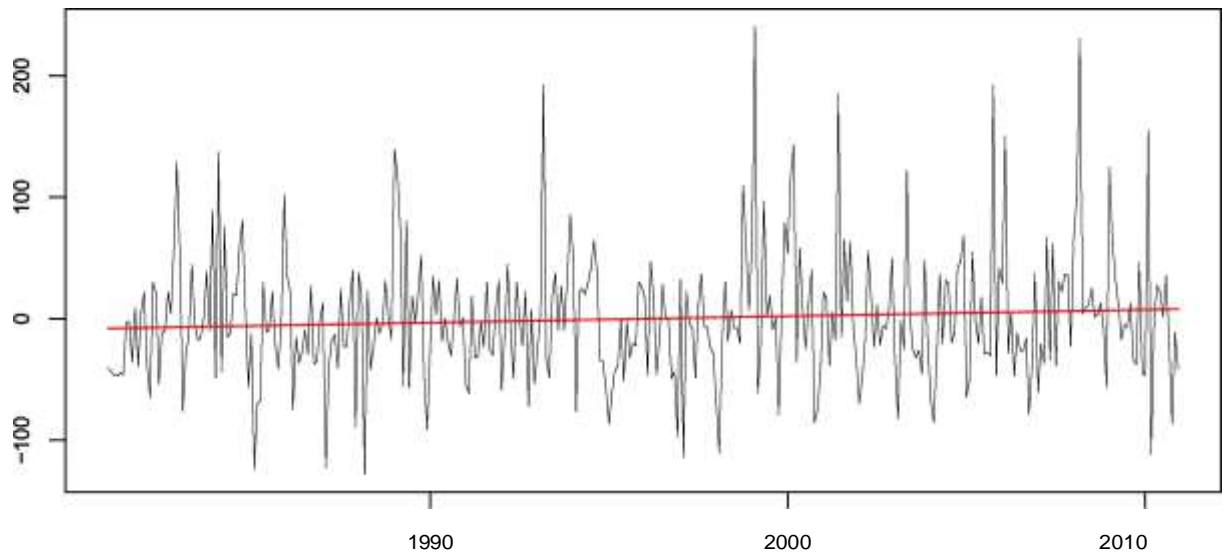


Base series and regression fit

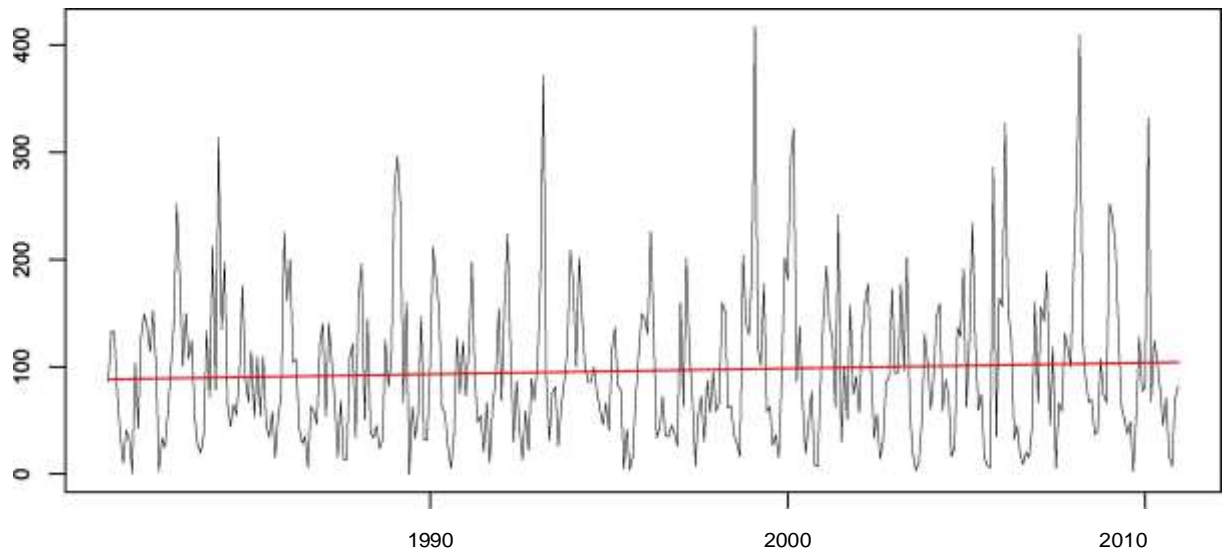


M0147 YANGANA

Base anomaly series and regression fit

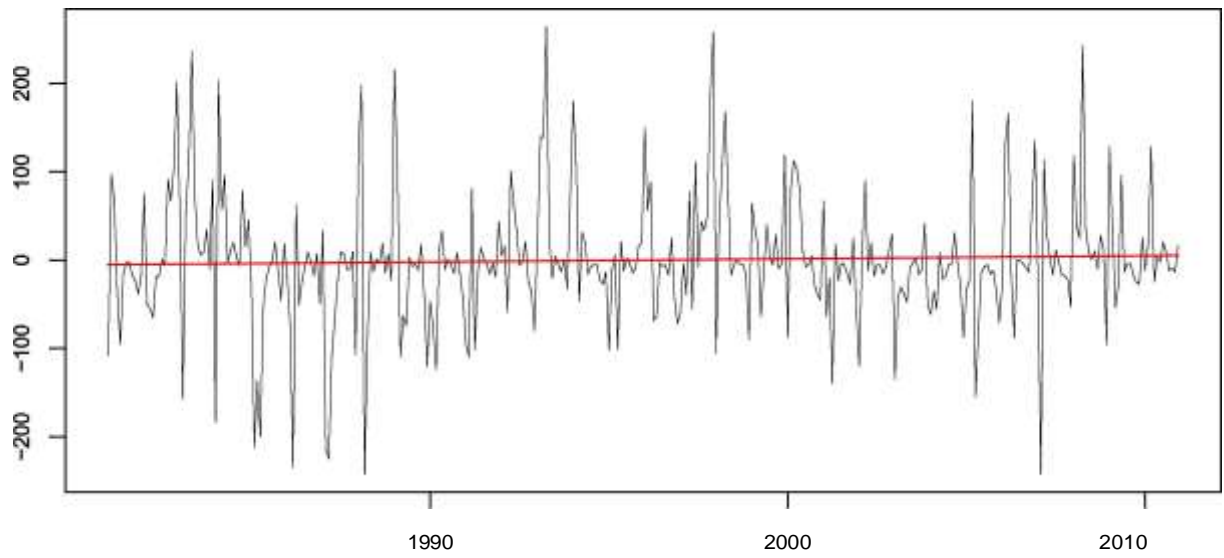


Base series and regression fit

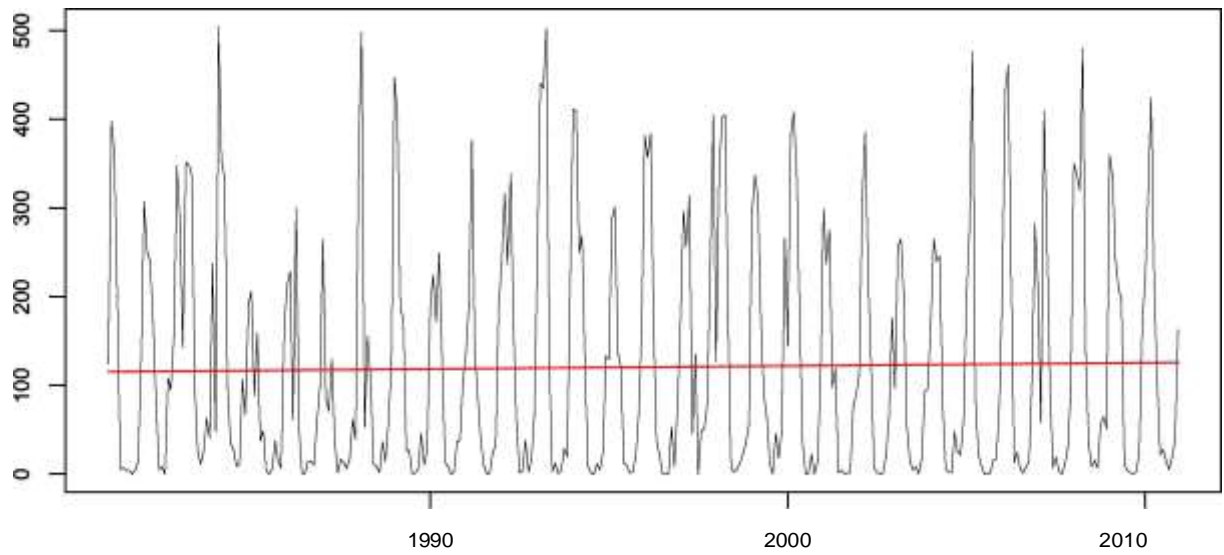


M0180 ZARUMA

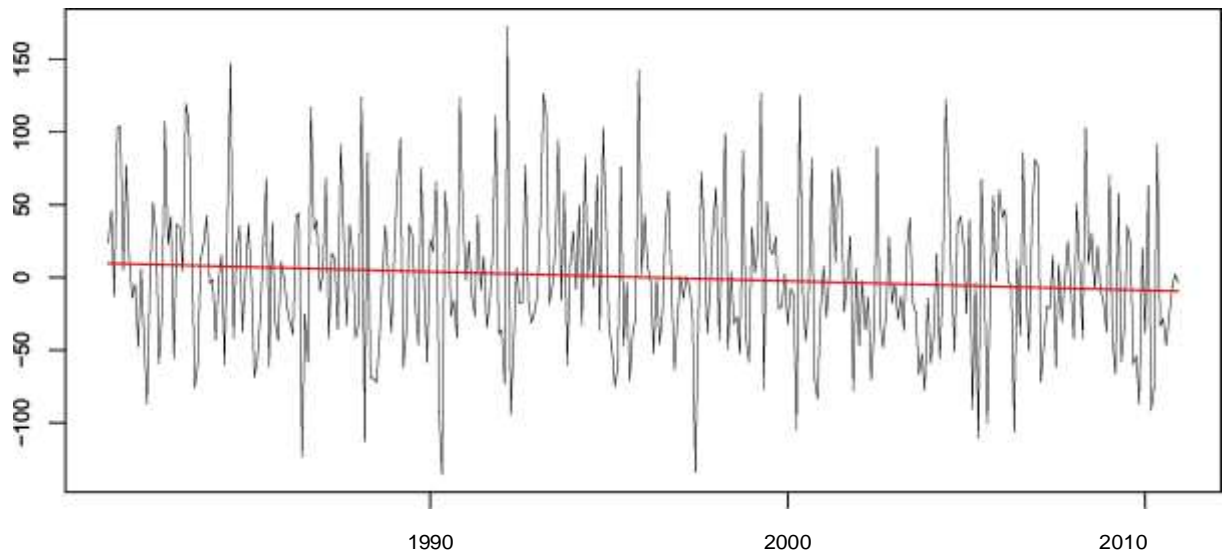
Base anomaly series and regression fit



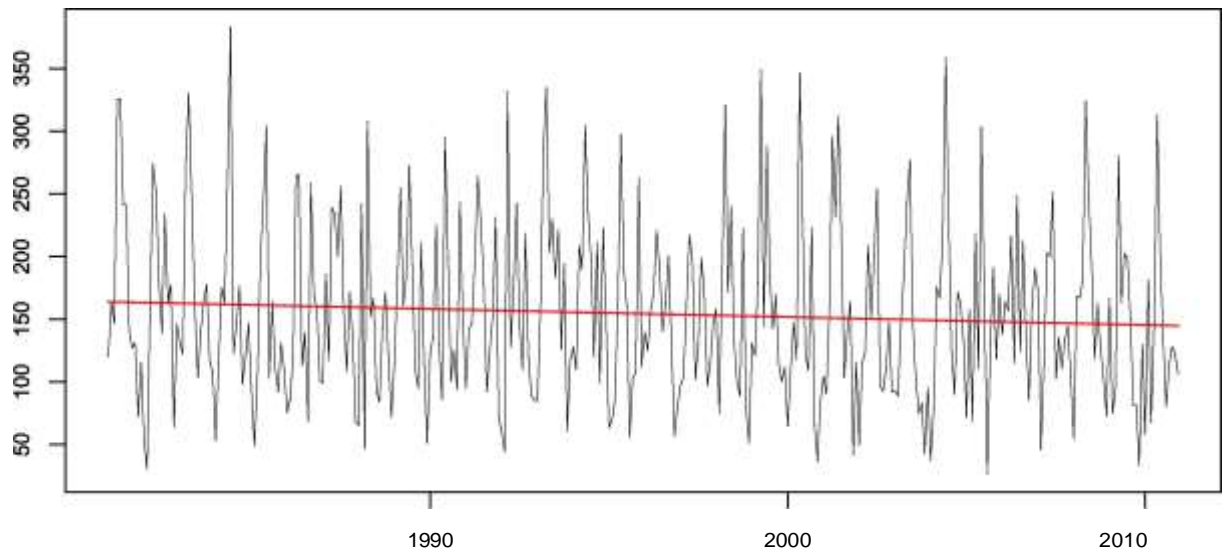
Base series and regression fit



Base anomaly series and regression fit

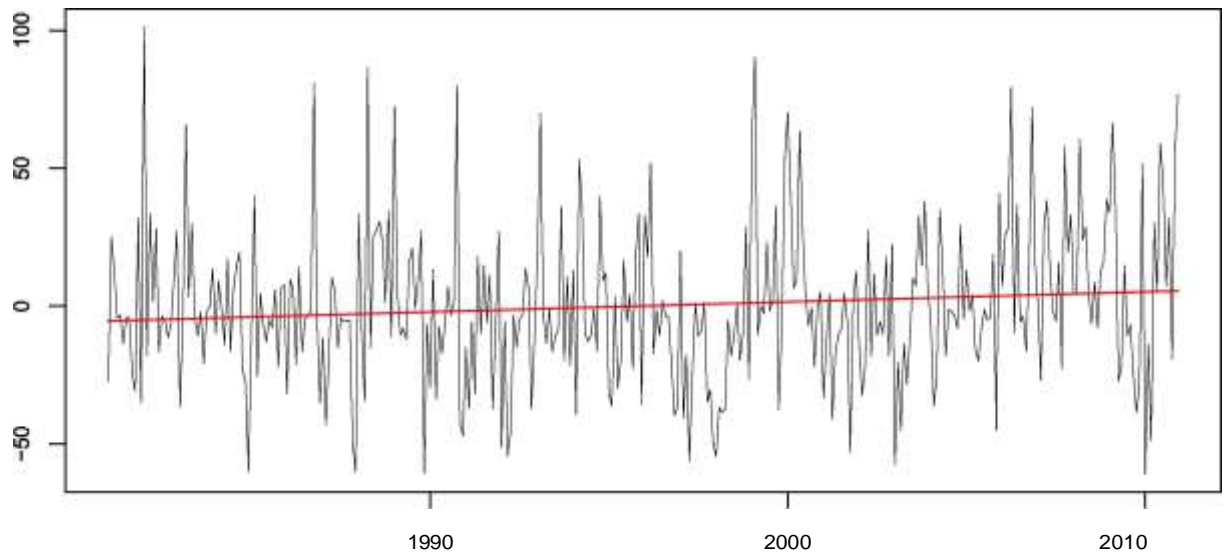


Base series and regression fit

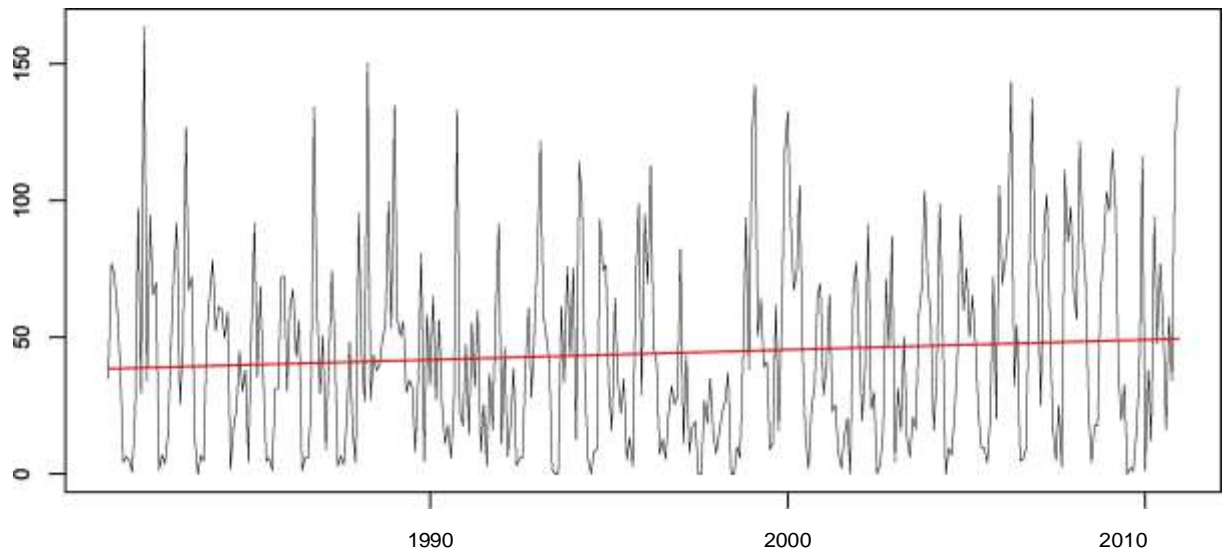


M0301 FF CC CARCHI

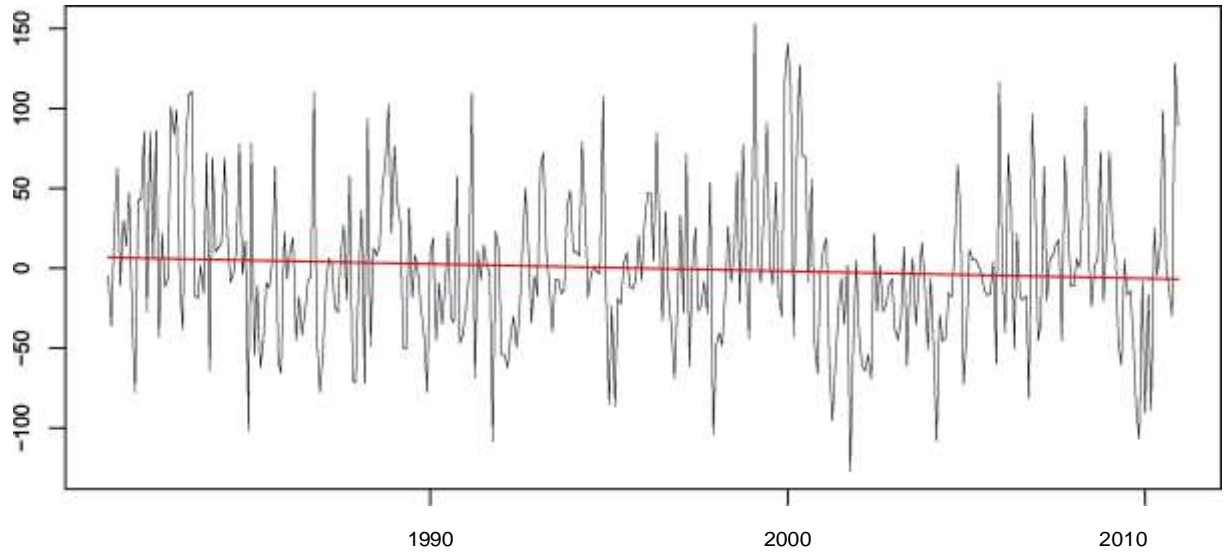
Base anomaly series and regression fit



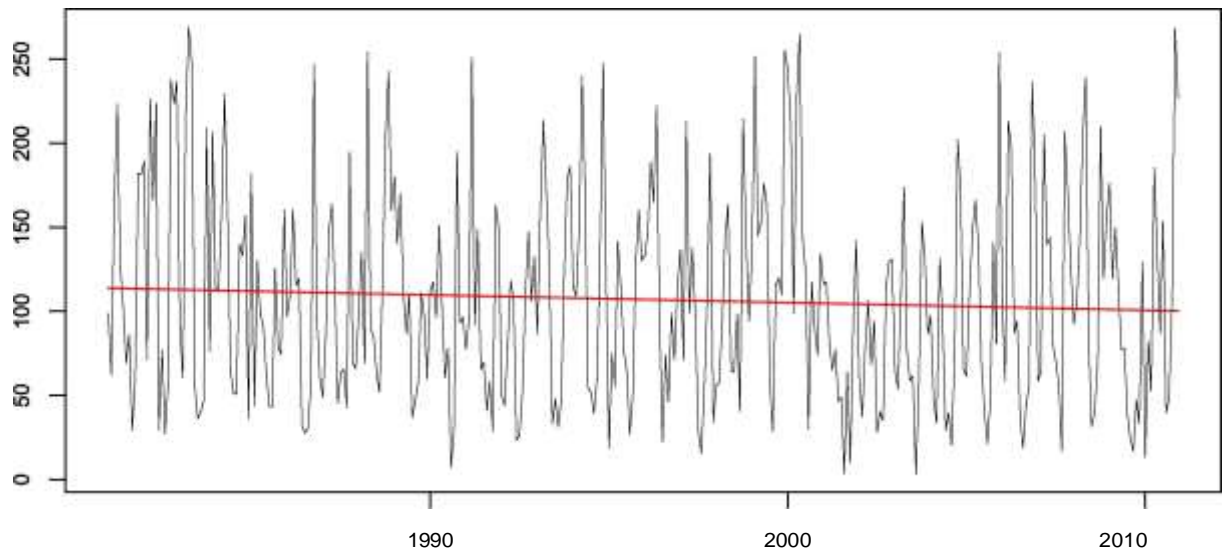
Base series and regression fit



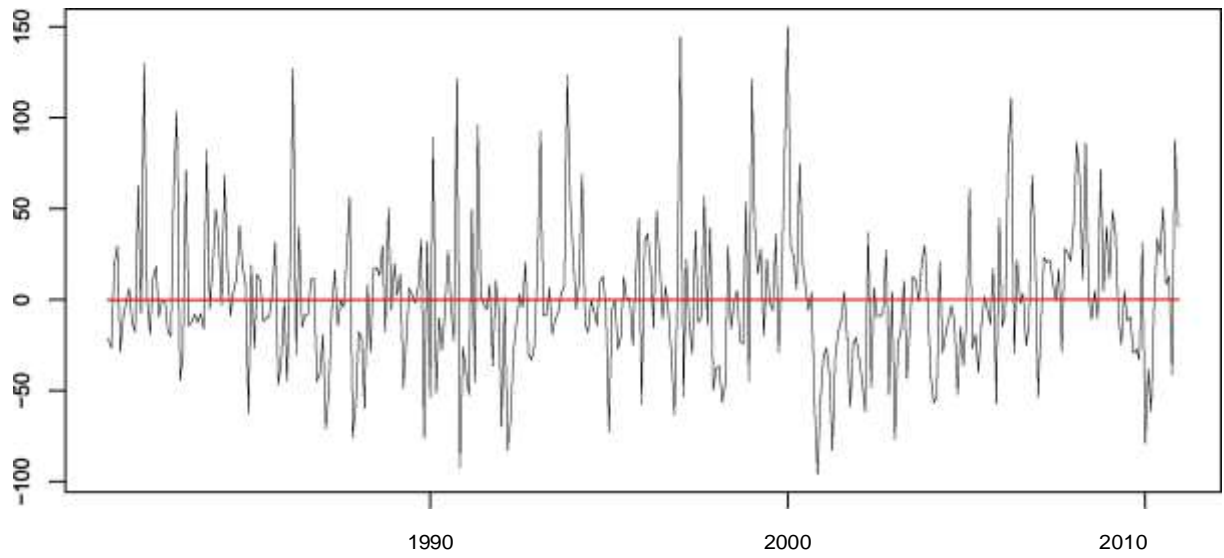
Base anomaly series and regression fit



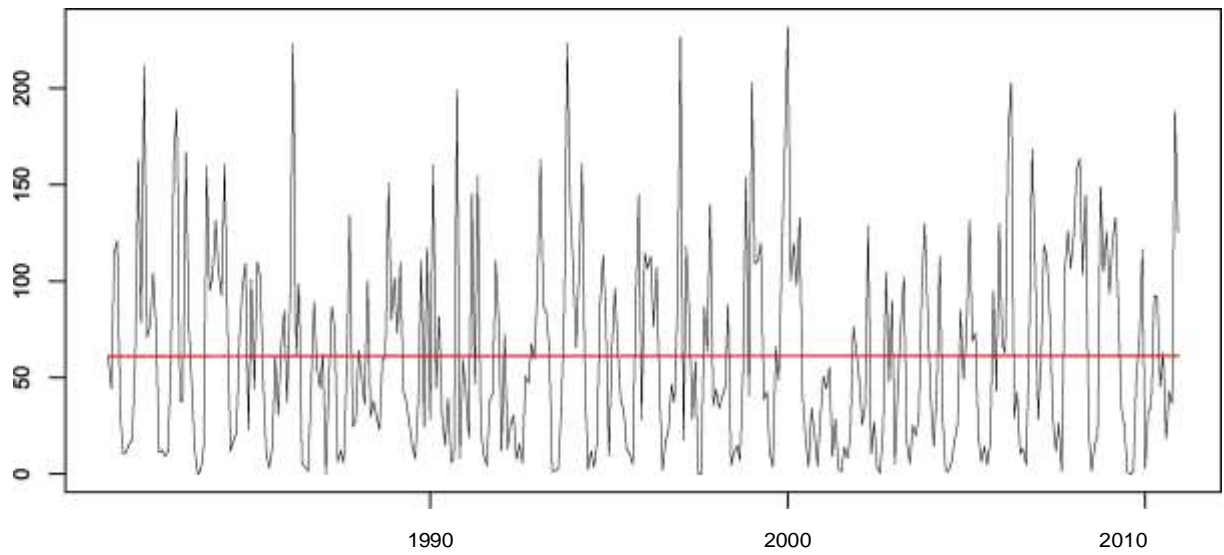
Base series and regression fit



Base anomaly series and regression fit

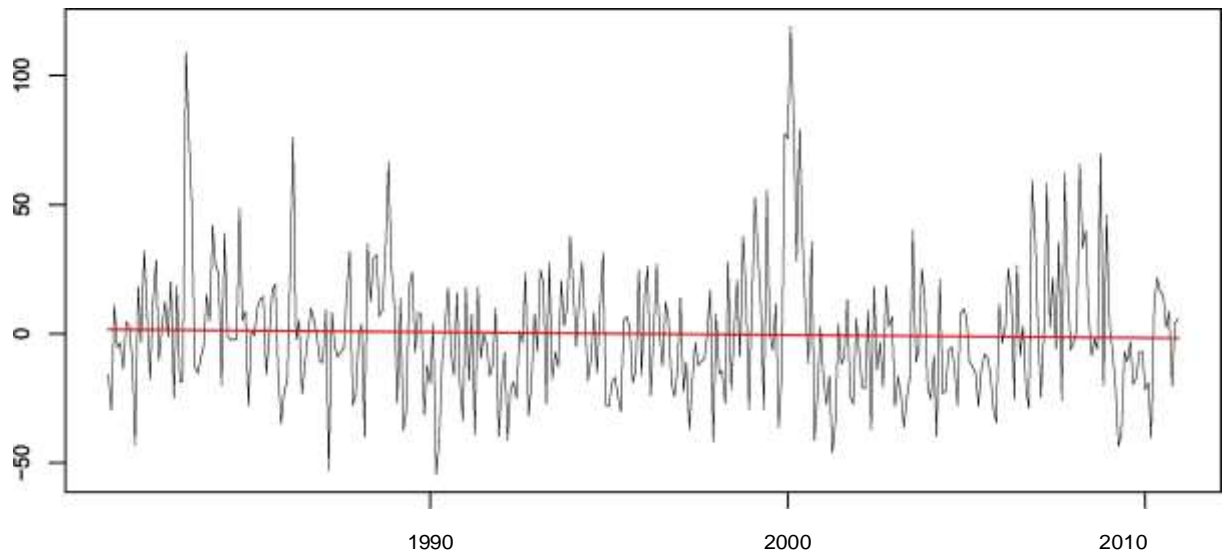


Base series and regression fit

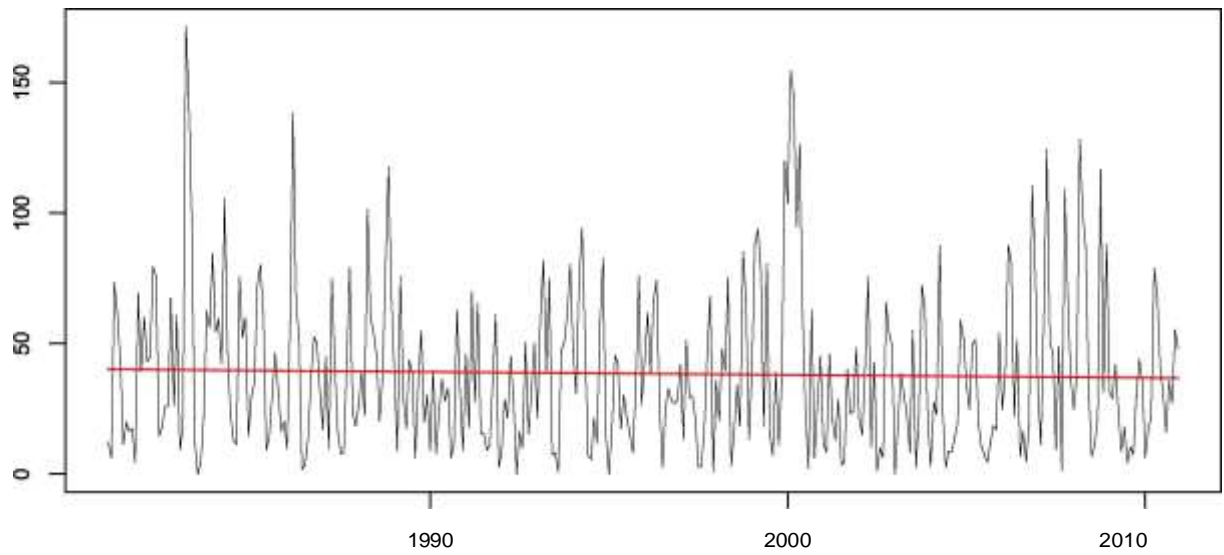


M0314 AMBUQUI

Base anomaly series and regression fit

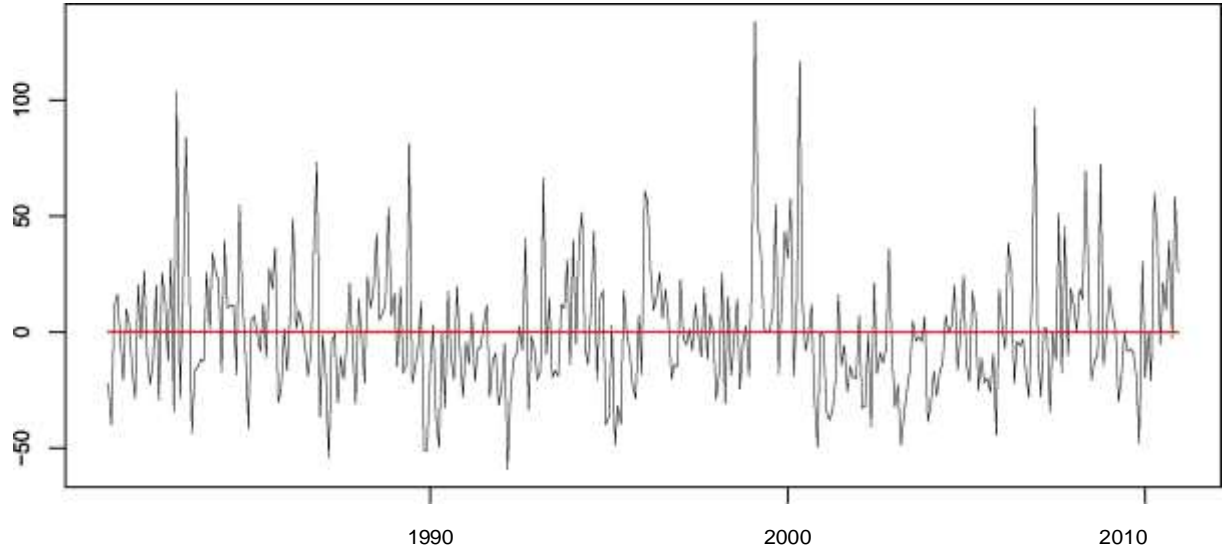


Base series and regression fit

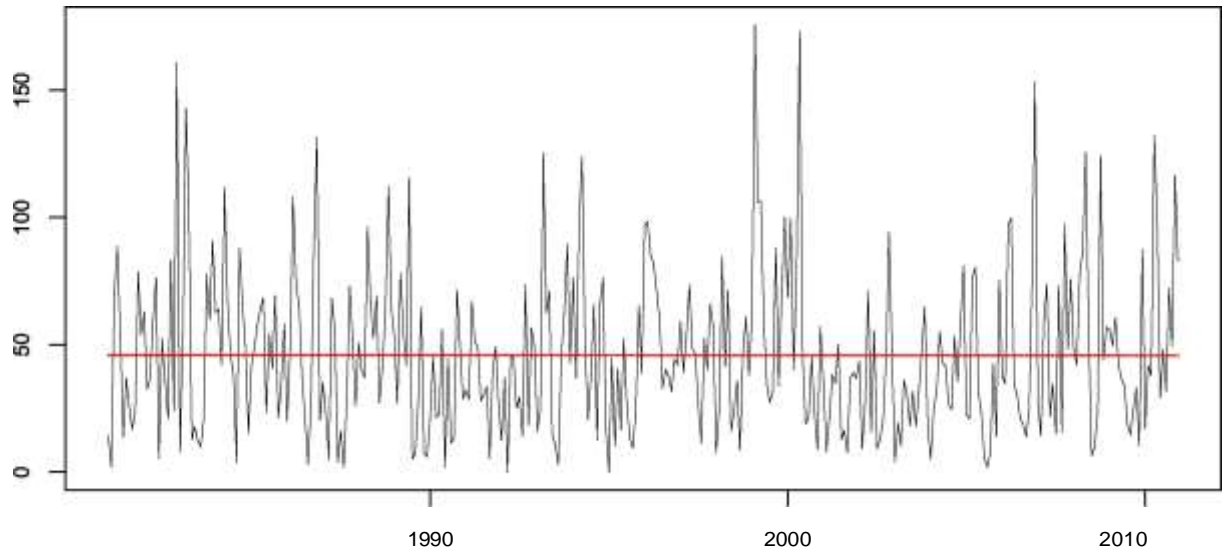


M0315 PIMAMPIRO

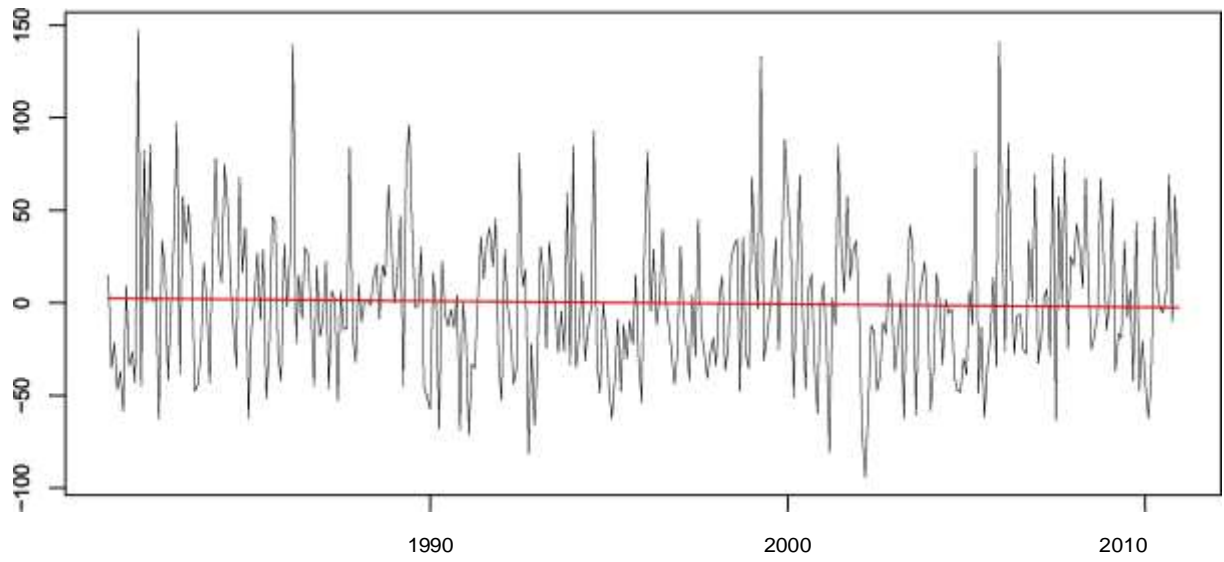
Base anomaly series and regression fit



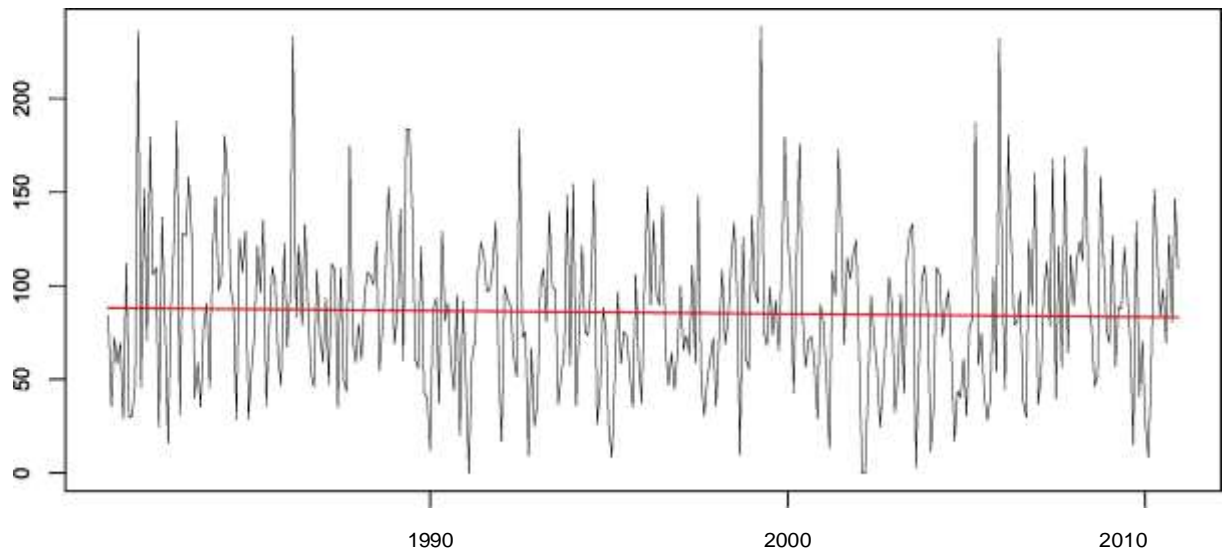
Base series and regression fit



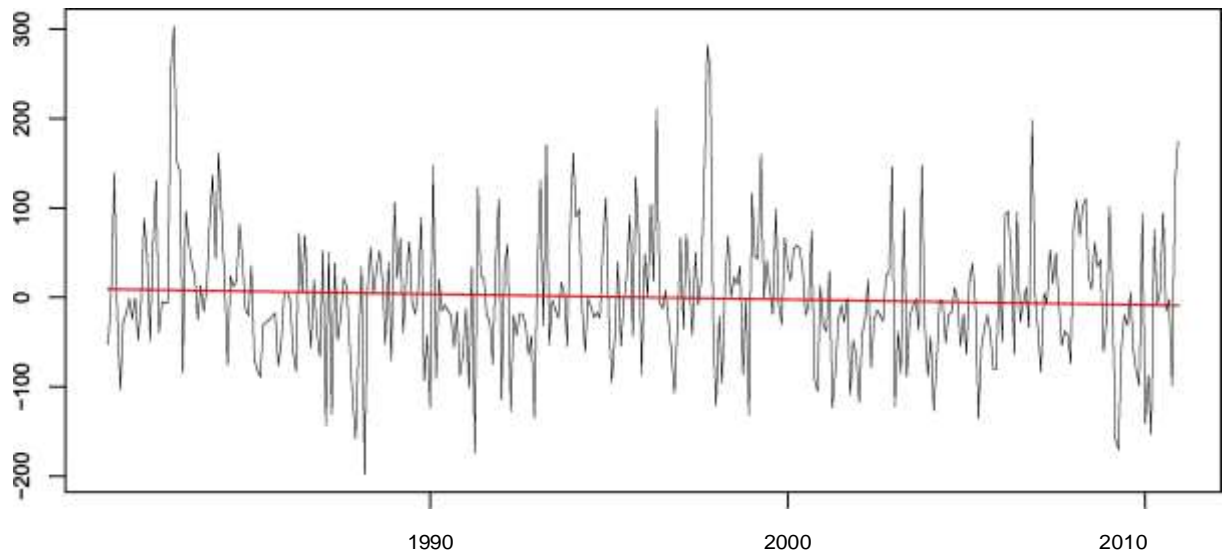
Base anomaly series and regression fit



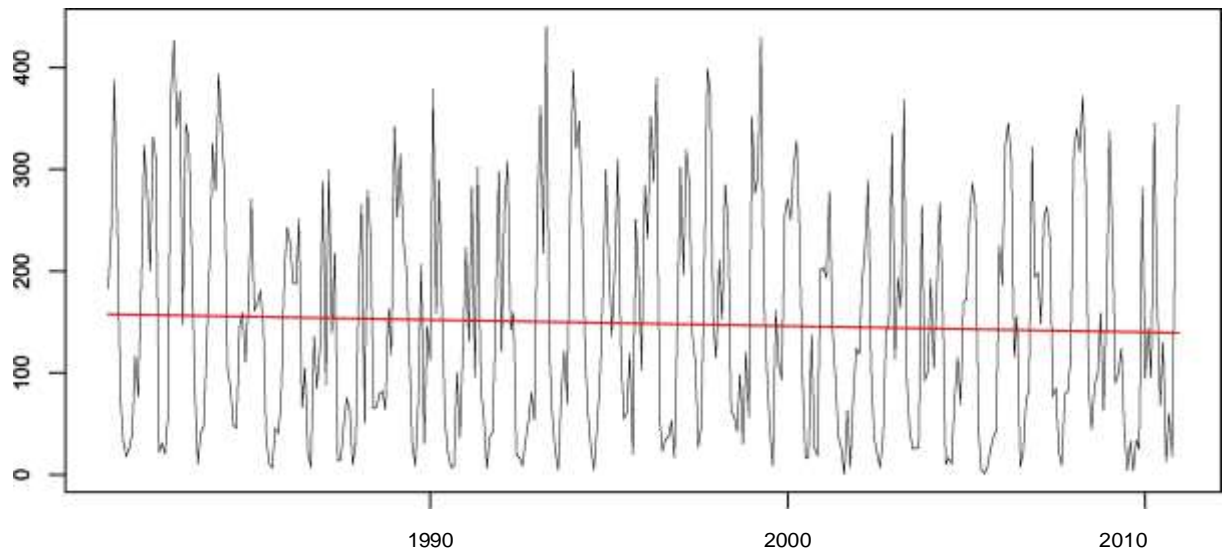
Base series and regression fit



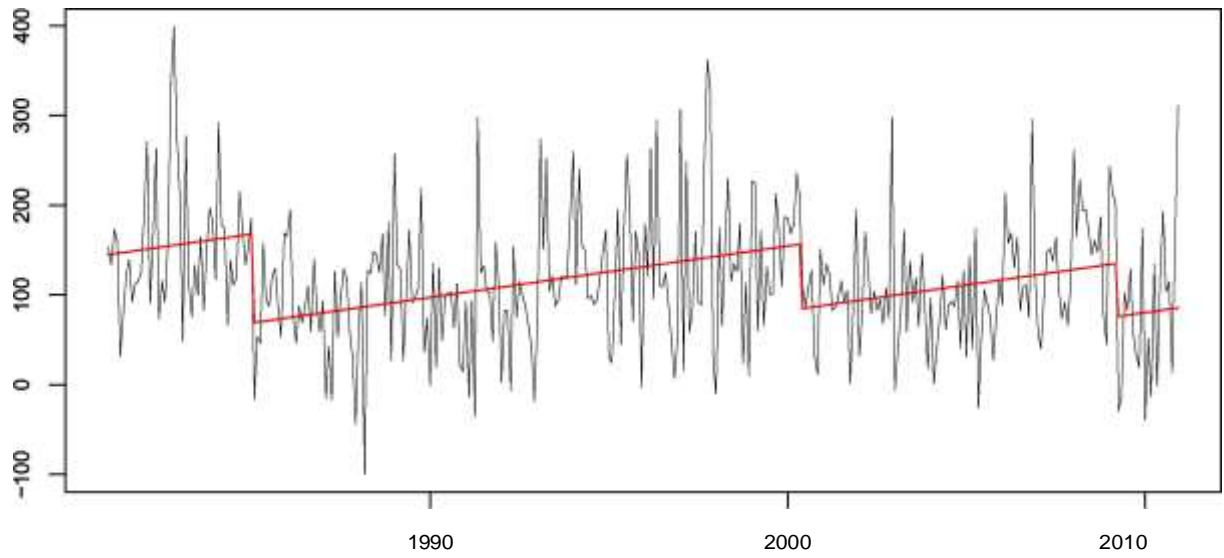
Base anomaly series and regression fit



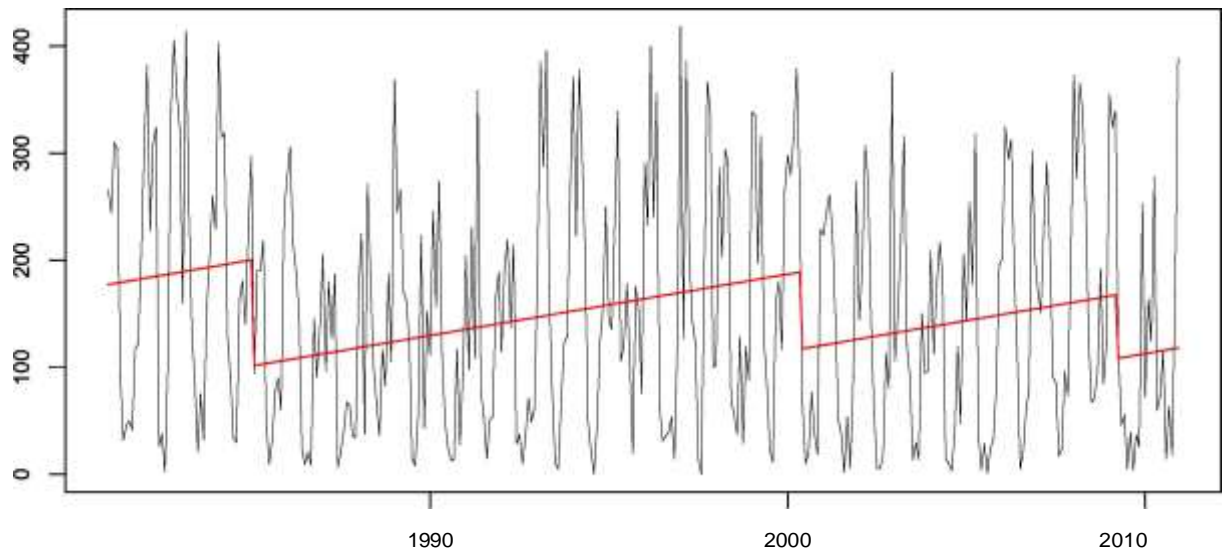
Base series and regression fit



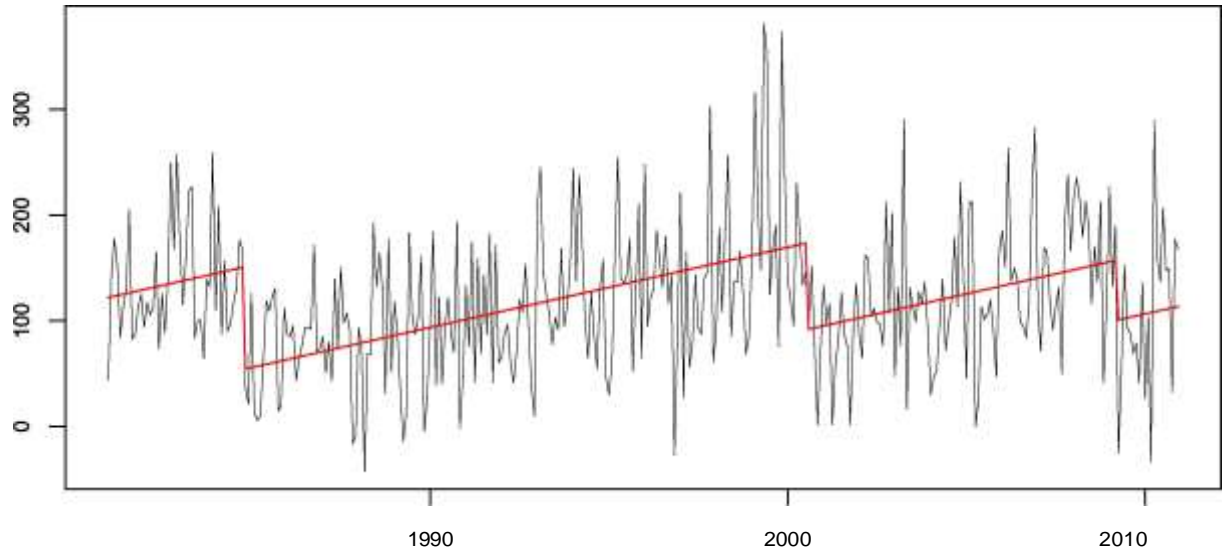
Base anomaly series and regression fit



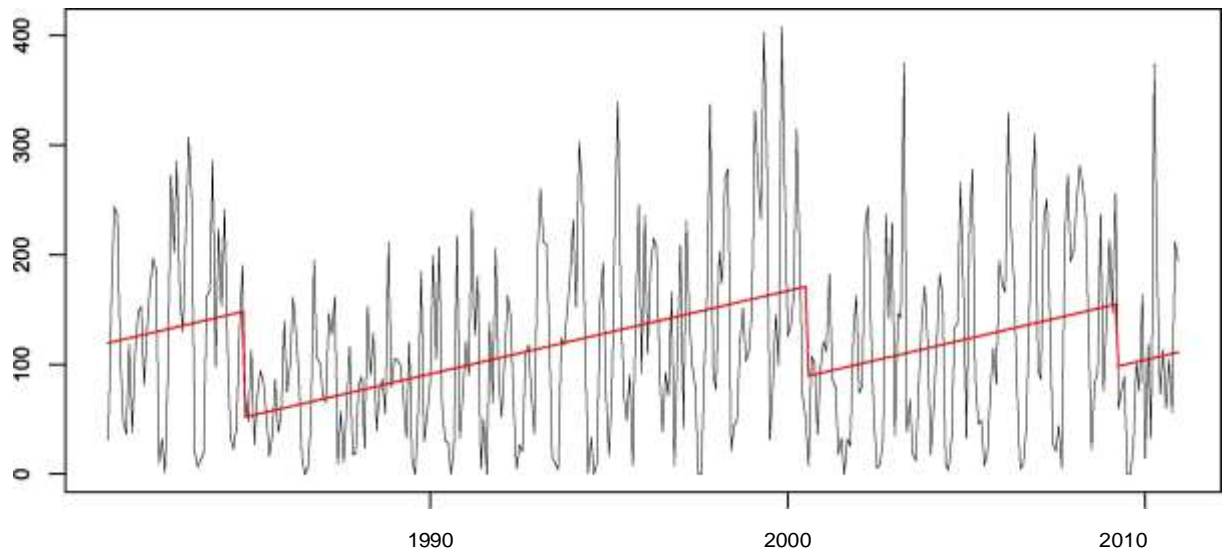
Base series and regression fit



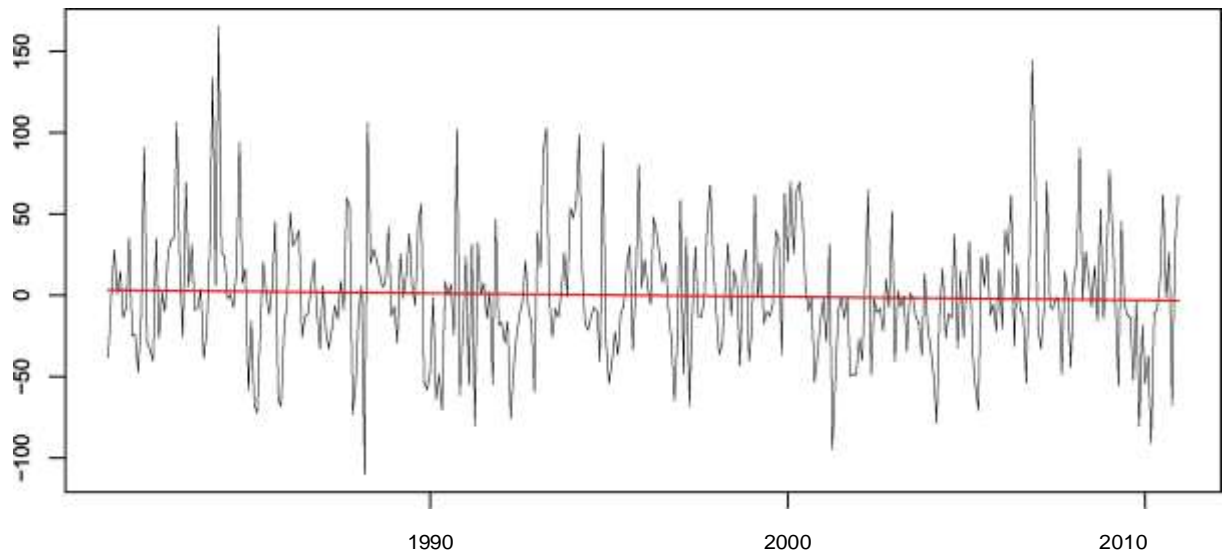
Base anomaly series and regression fit



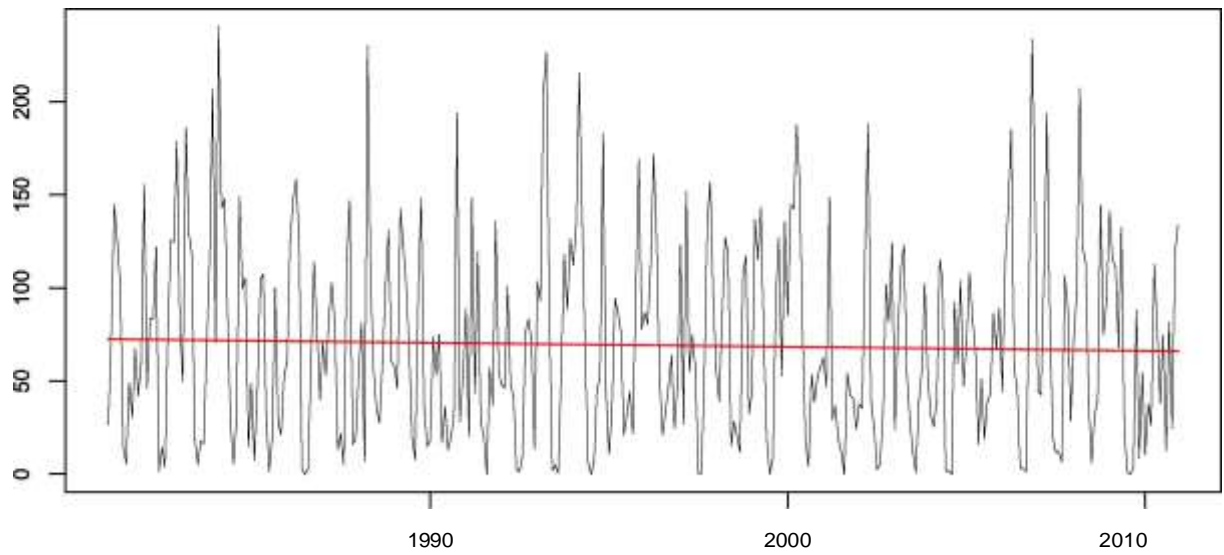
Base series and regression fit



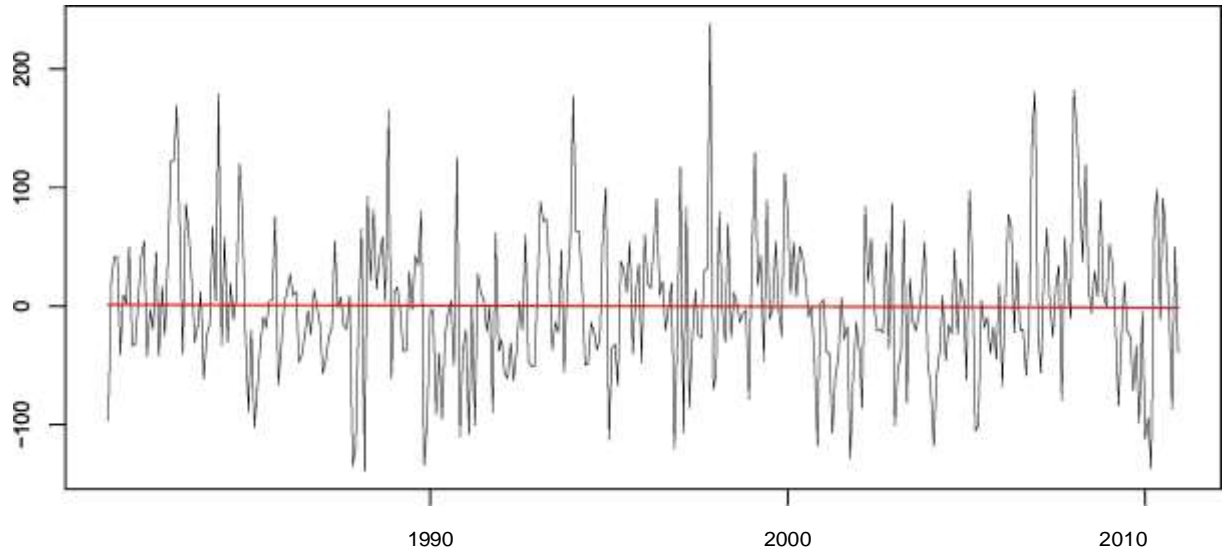
Base anomaly series and regression fit



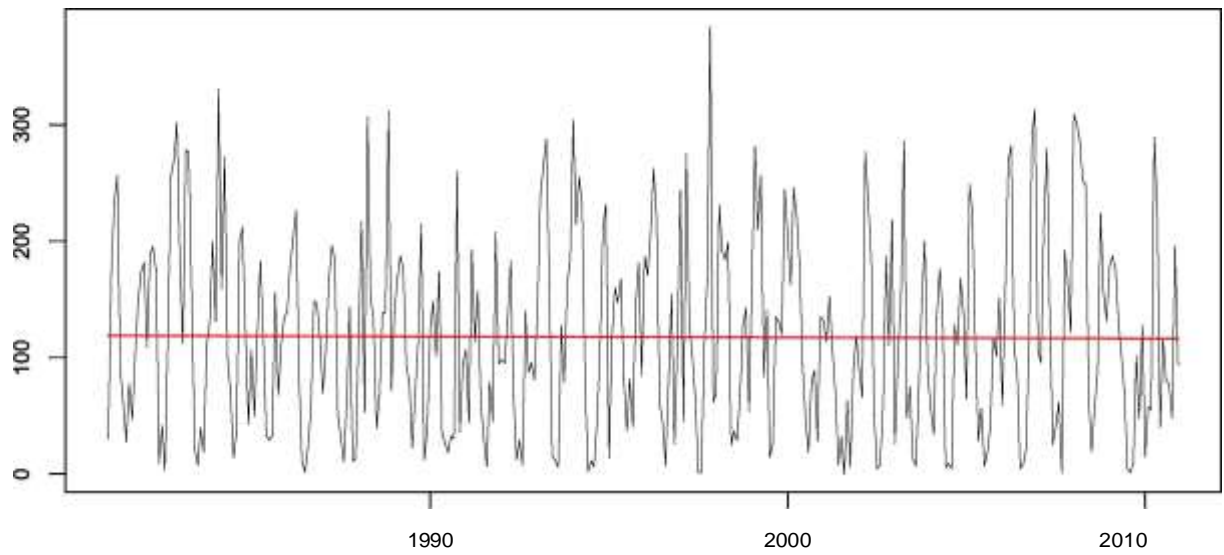
Base series and regression fit



Base anomaly series and regression fit

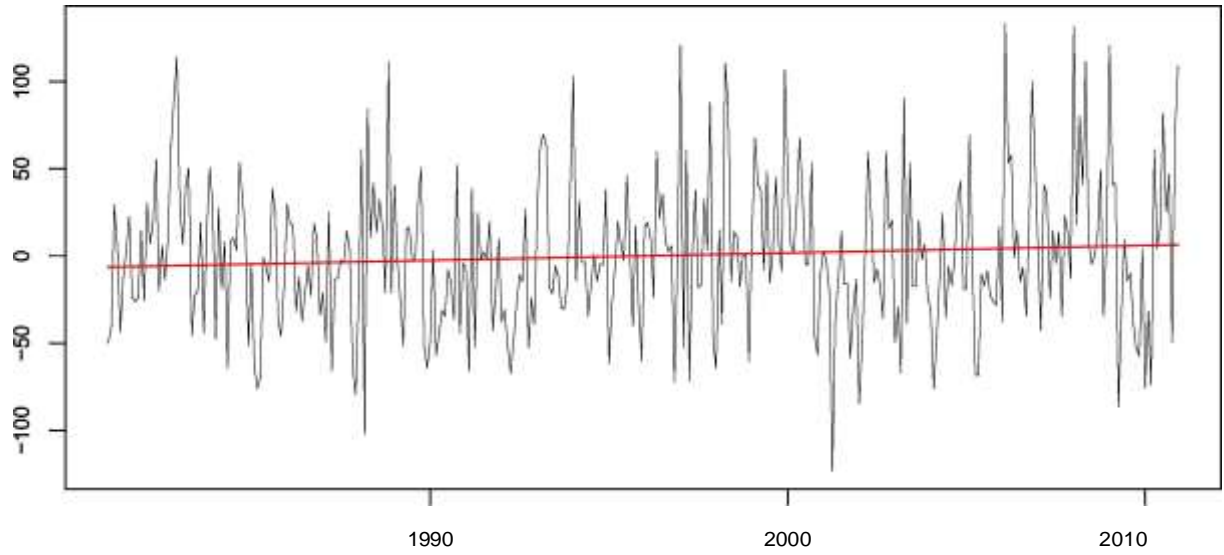


Base series and regression fit

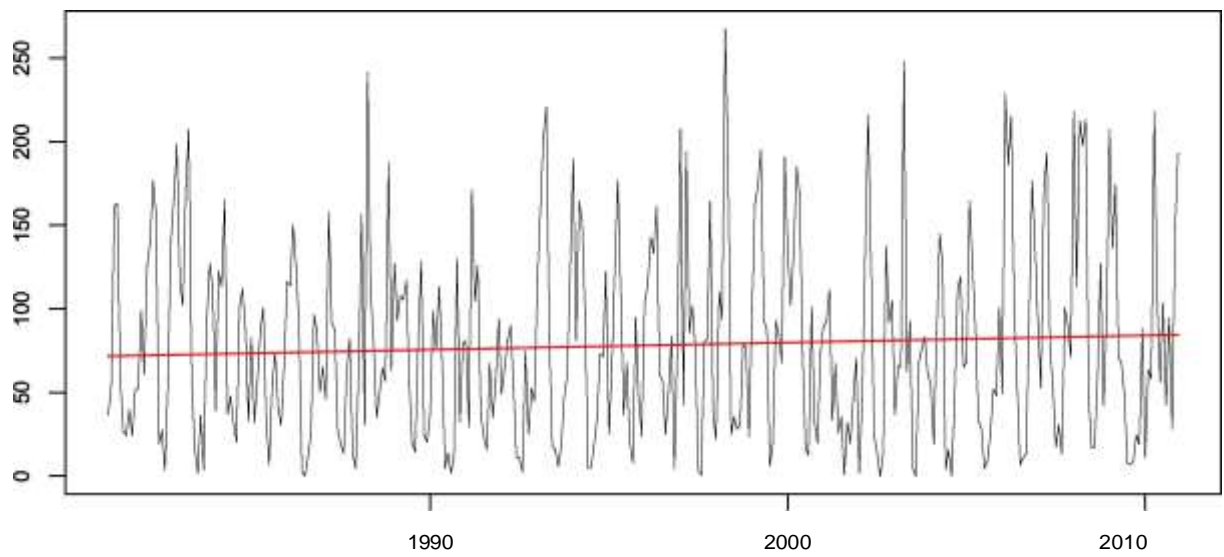


M0361 NONO QUITO

Base anomaly series and regression fit

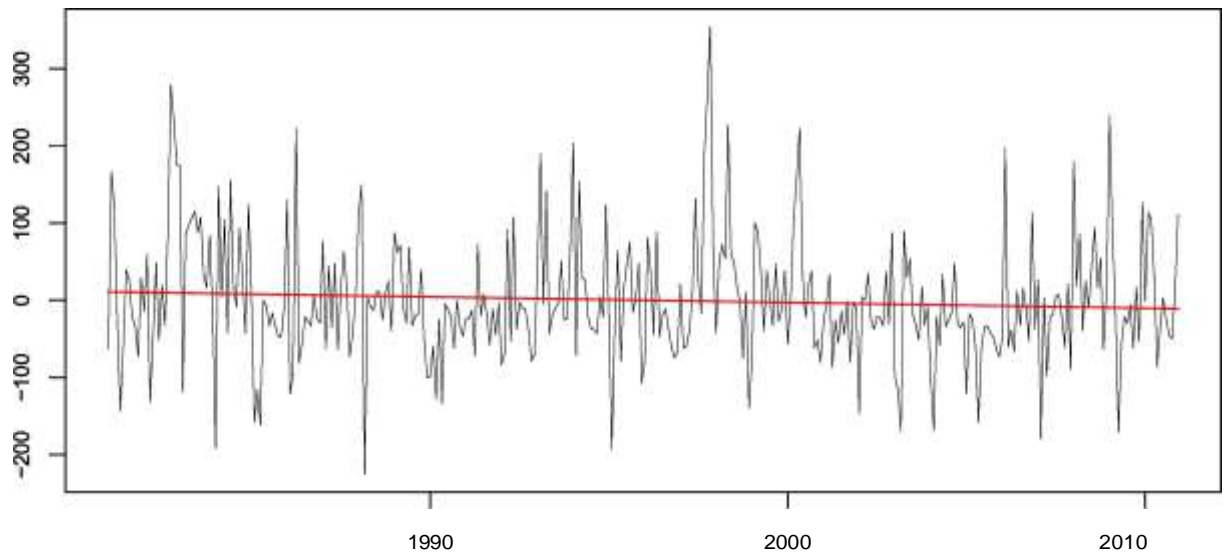


Base series and regression fit

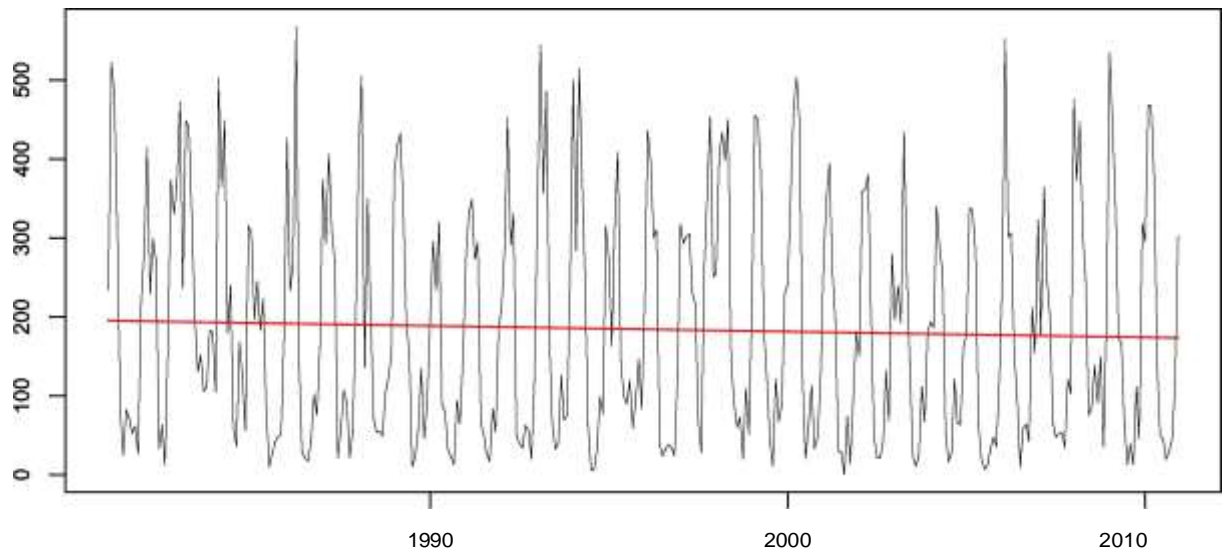


M0362 LAS PAMPAS

Base anomaly series and regression fit

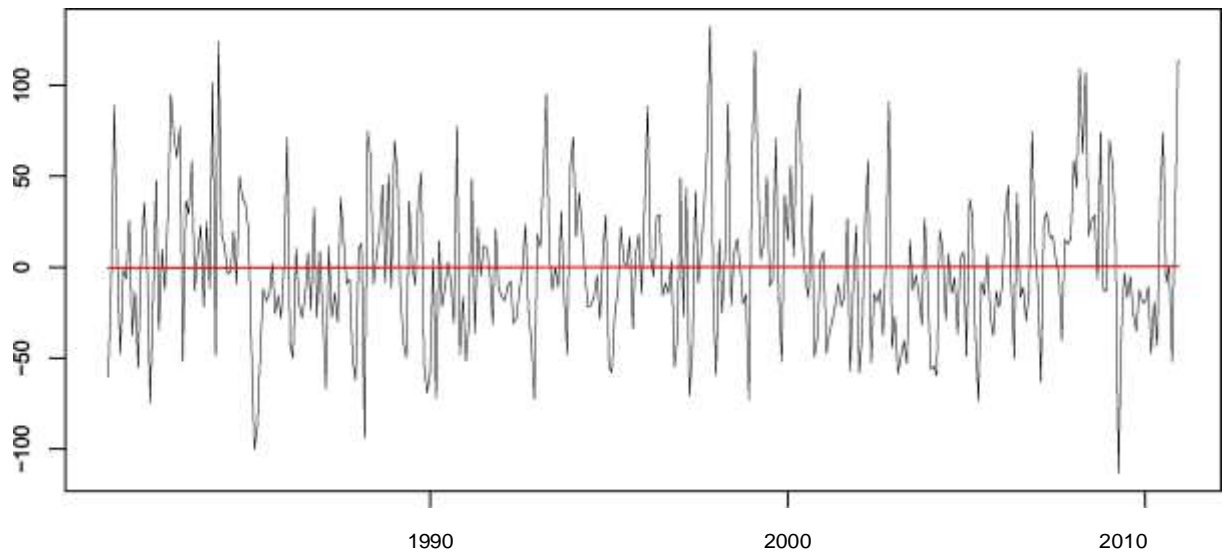


Base series and regression fit

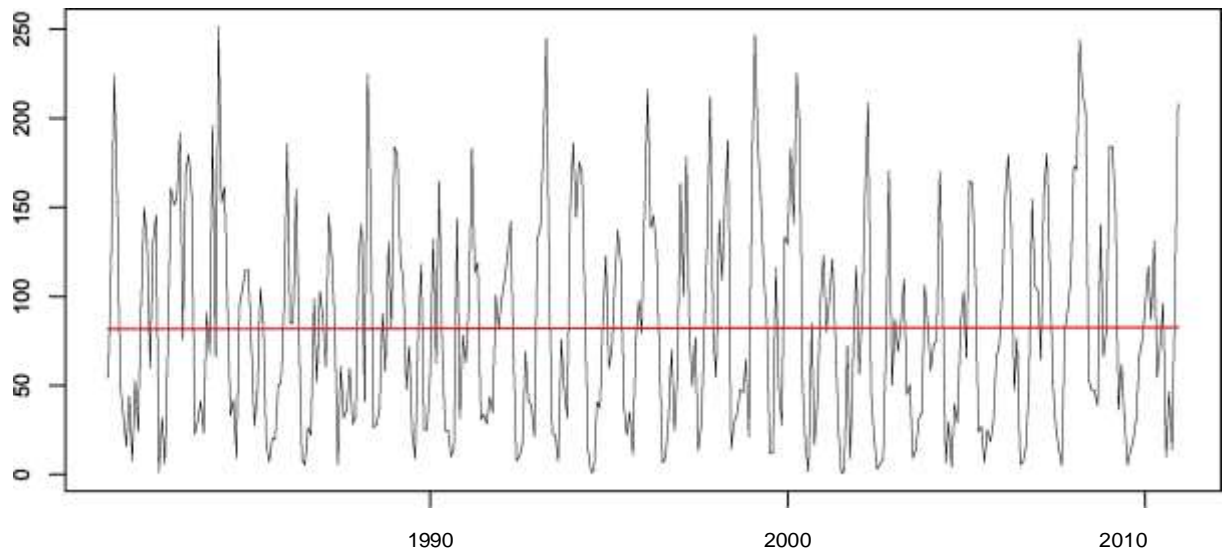


M0363 SIGCHOS

Base anomaly series and regression fit

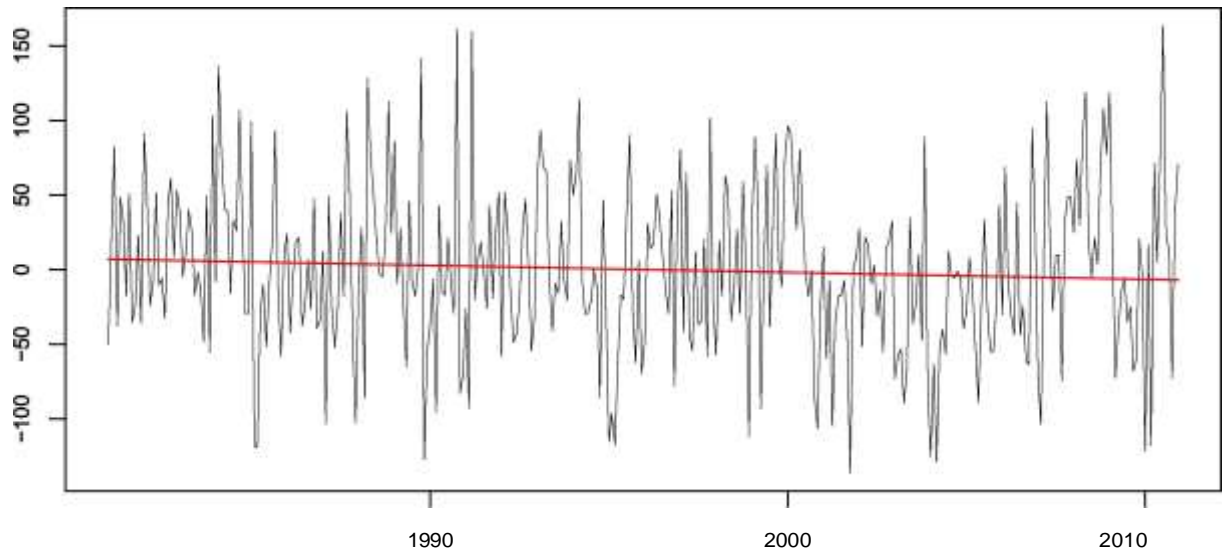


Base series and regression fit

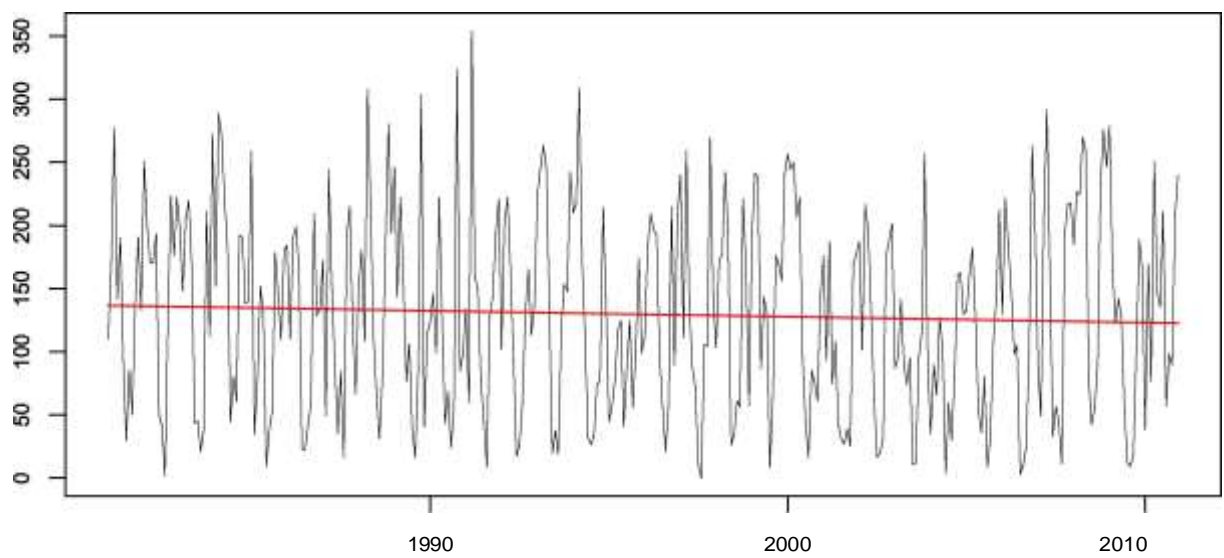


M0364 LORETO PEDREGAL QUITO

Base anomaly series and regression fit



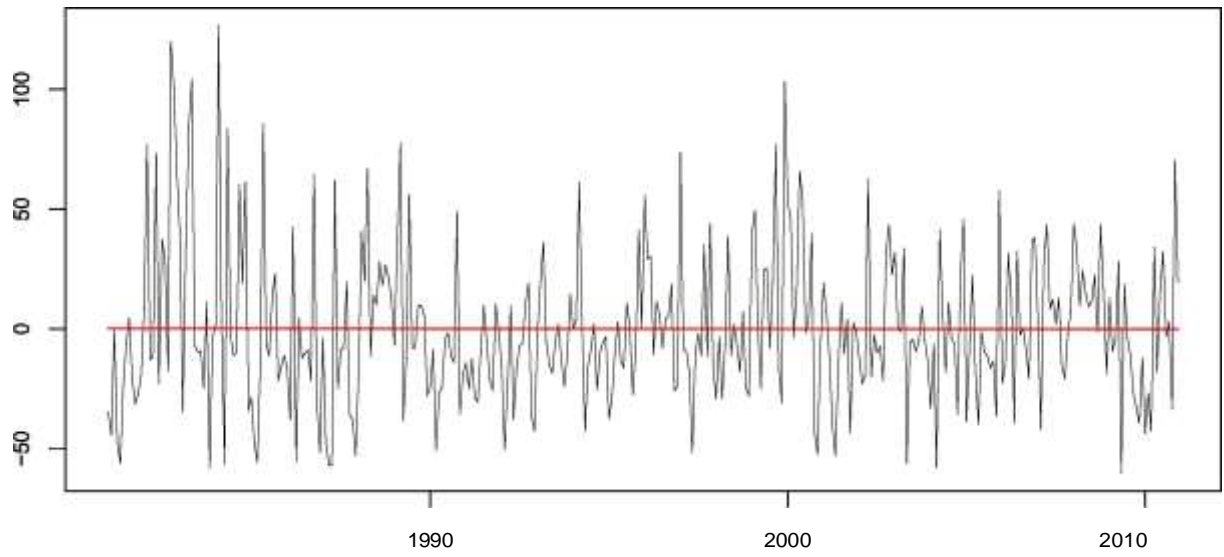
Base series and regression fit



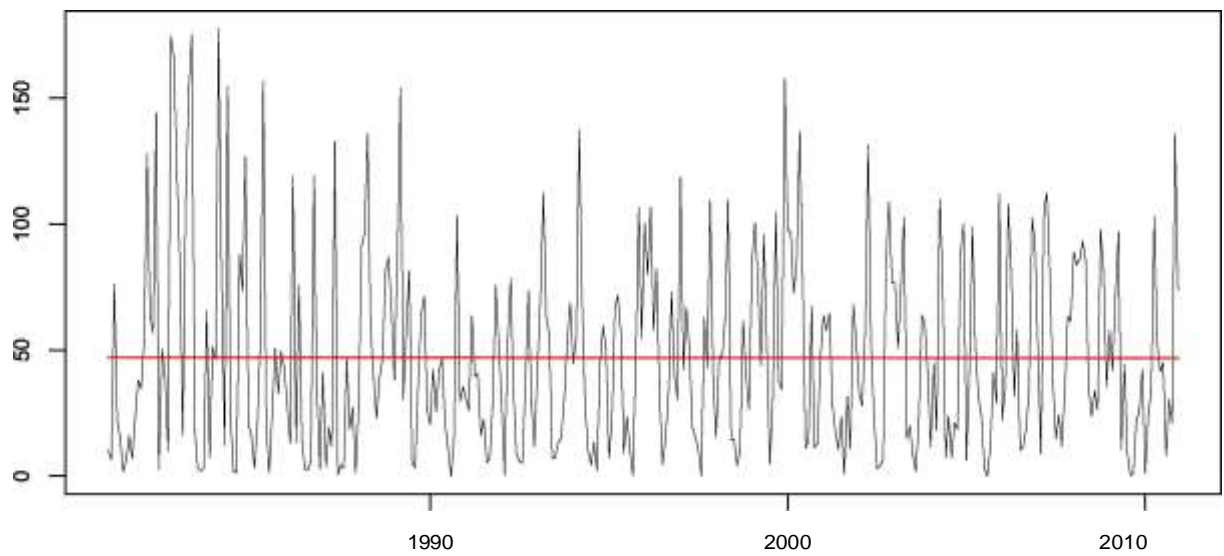
Mean-adjusted base series

M0369 CUSUBAMBA

Base anomaly series and regression fit



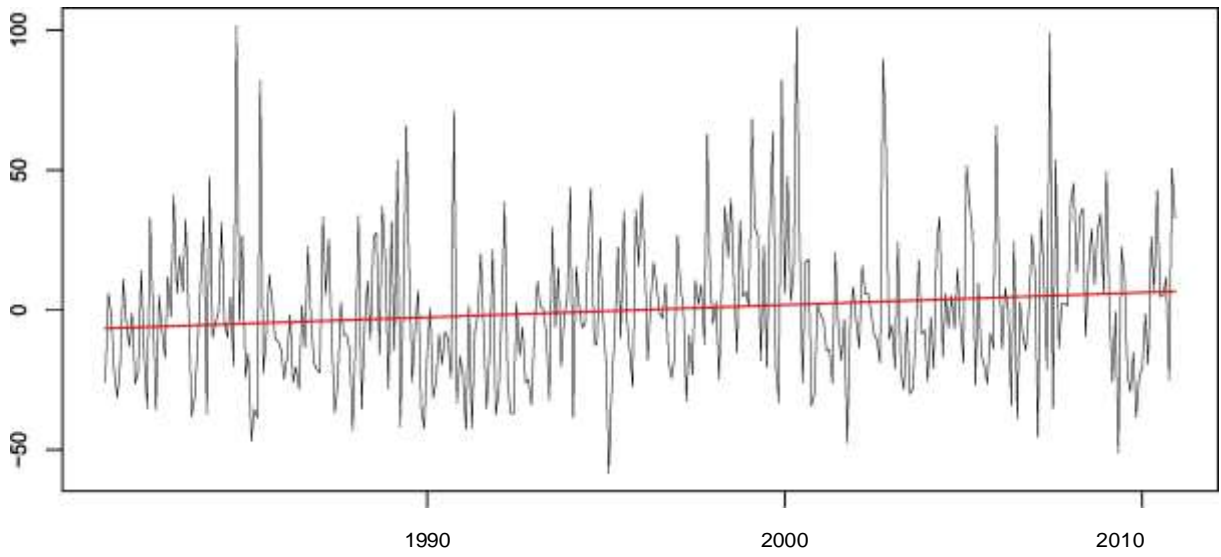
Base series and regression fit



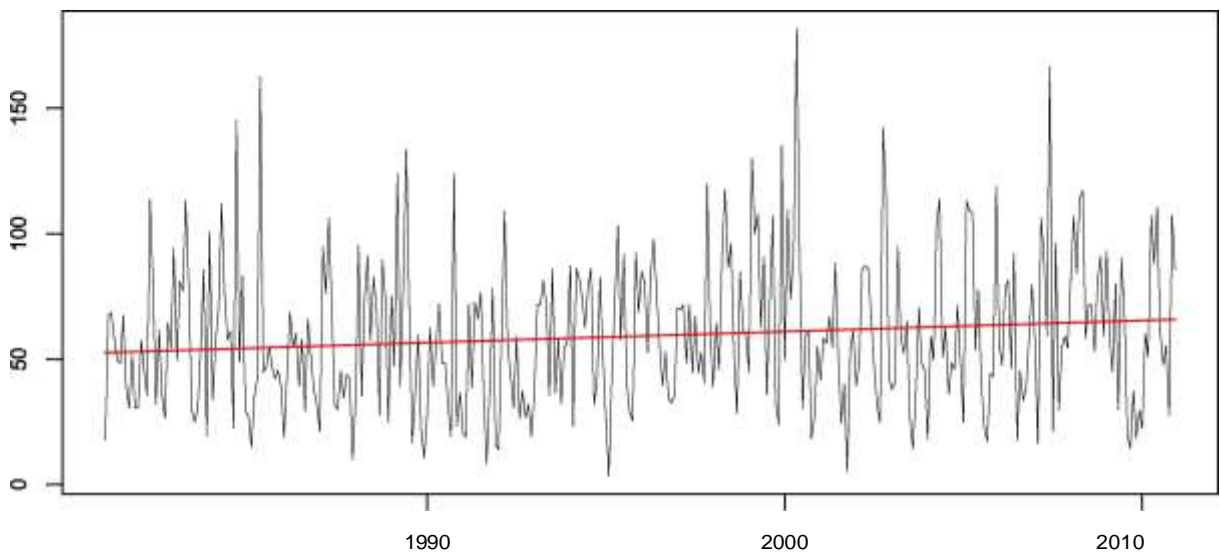
Mean-adjusted base series

M0376 PILAHUIN

Base anomaly series and regression fit



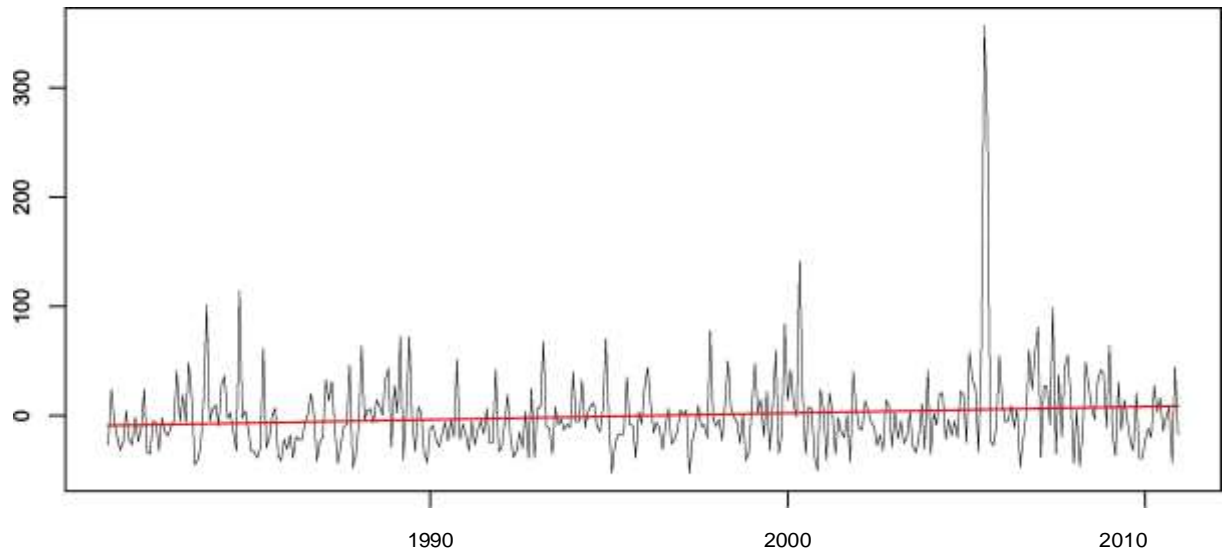
Base series and regression fit



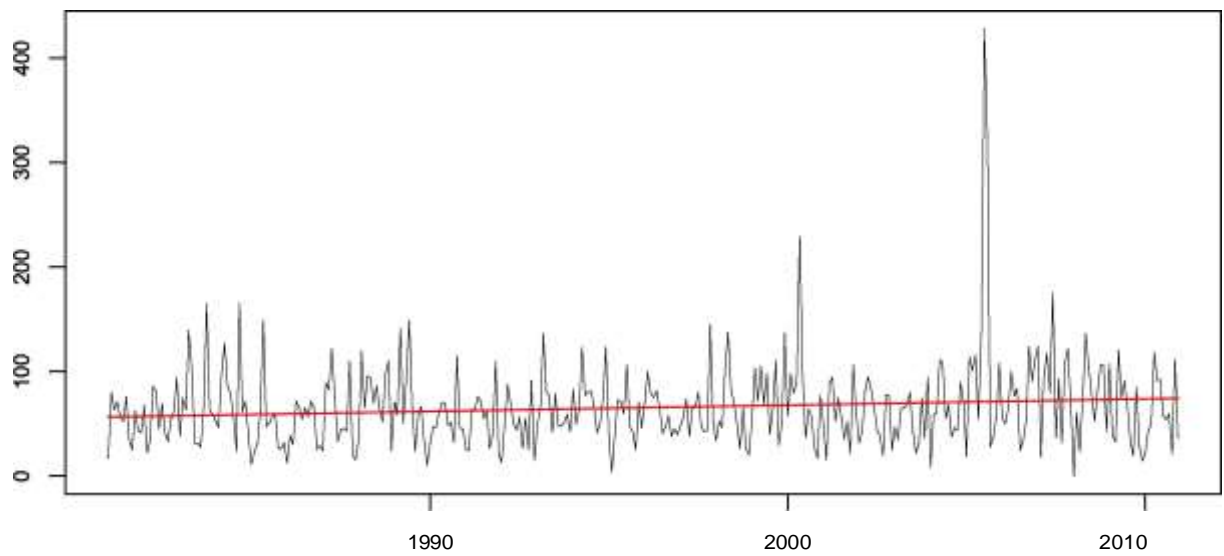
Mean-adjusted base series

M0377 TISALEO

Base anomaly series and regression fit



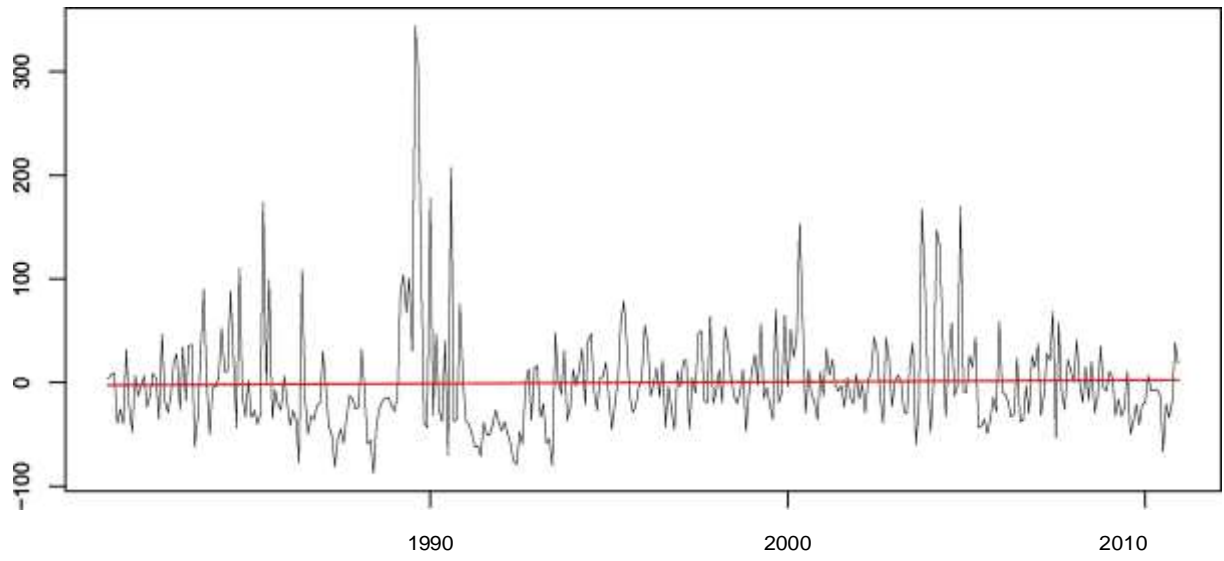
Base series and regression fit



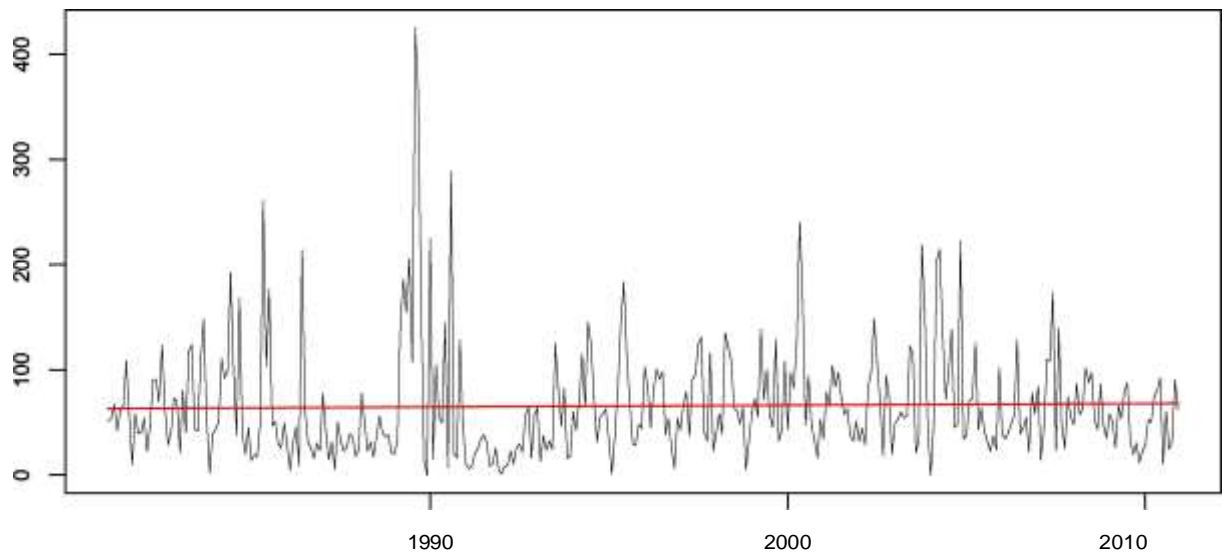
Mean-adjusted base series

M0380 HUAMBALO

Base anomaly series and regression fit



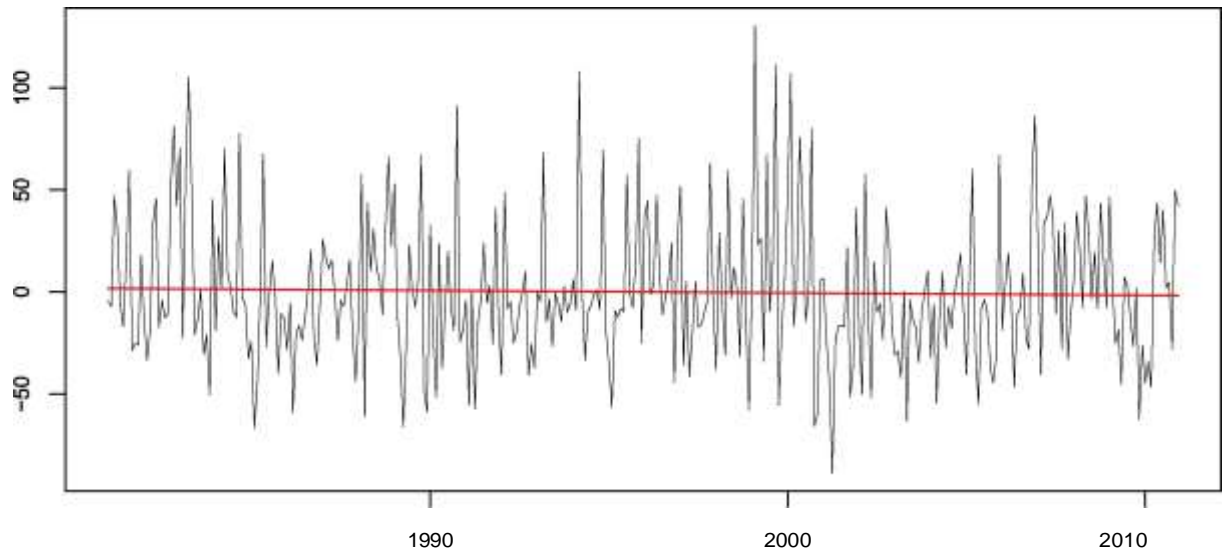
Base series and regression fit



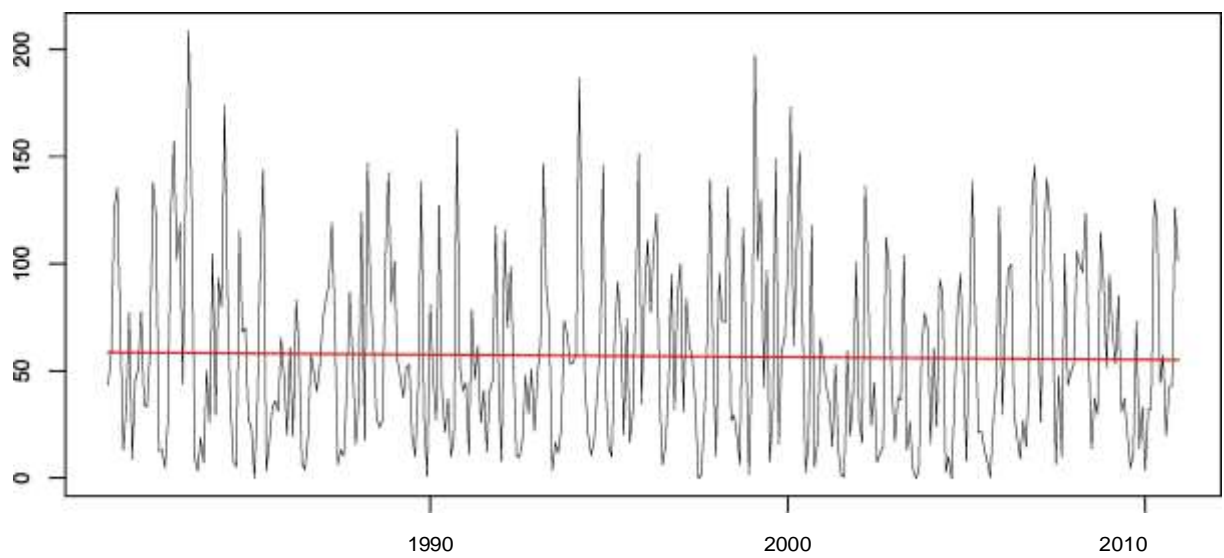
Mean-adjusted base series

M0393 SAN JUAN-CHIMBORAZO

Base anomaly series and regression fit



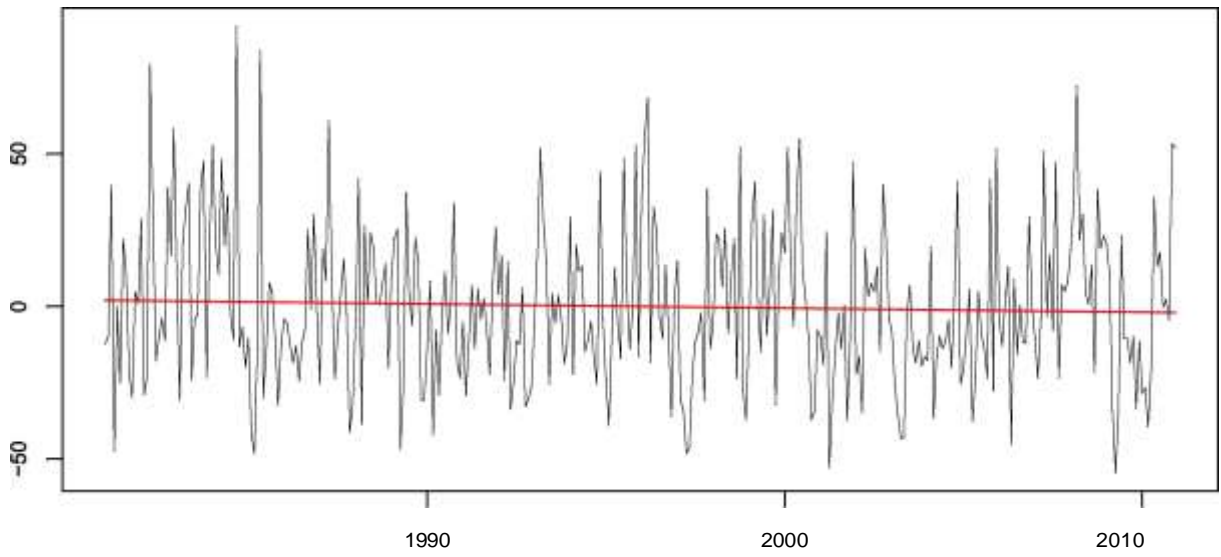
Base series and regression fit



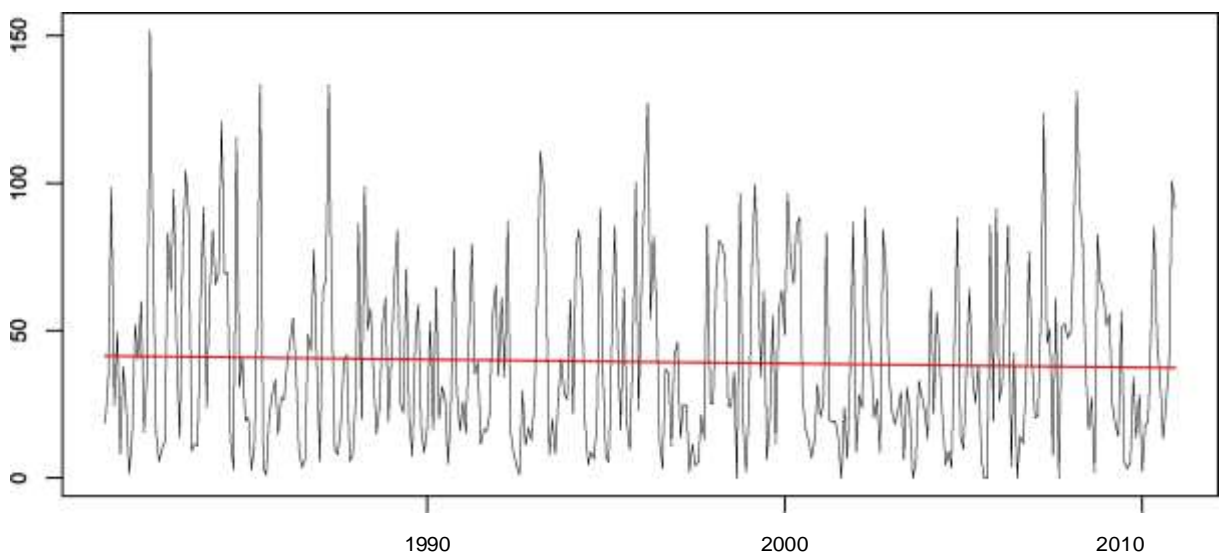
Mean-adjusted base series

M0408 GUANO

Base anomaly series and regression fit

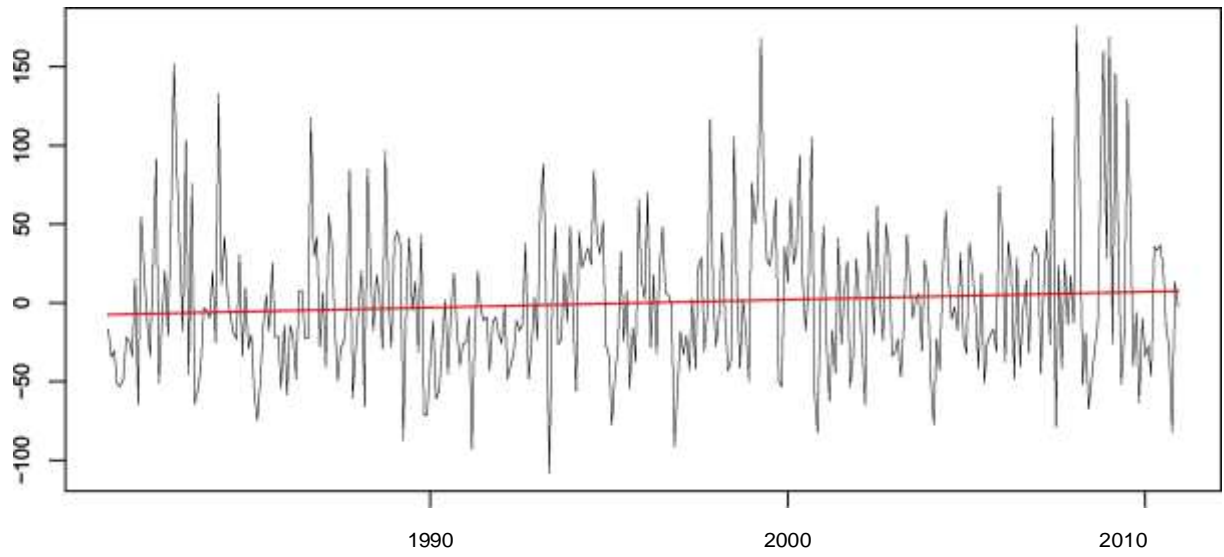


Base series and regression fit

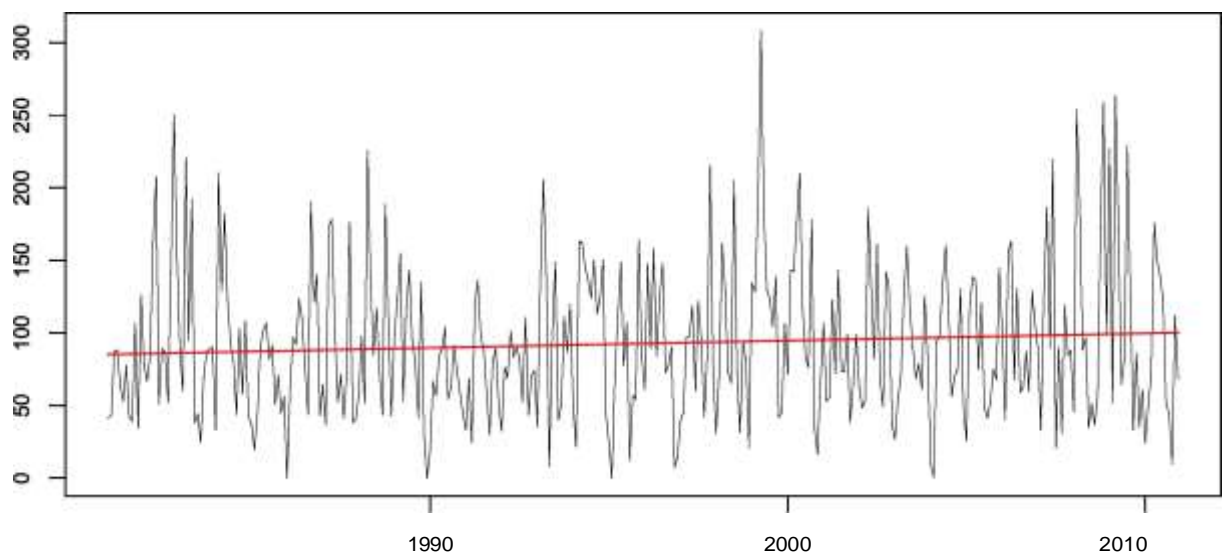


Mean-adjusted base series

Base anomaly series and regression fit



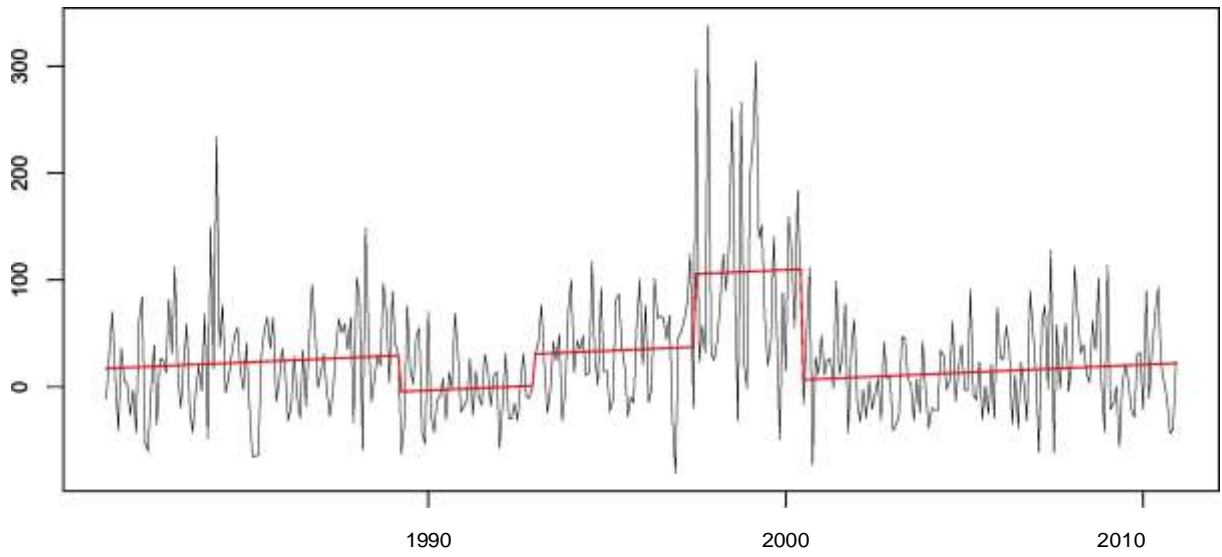
Base series and regression fit



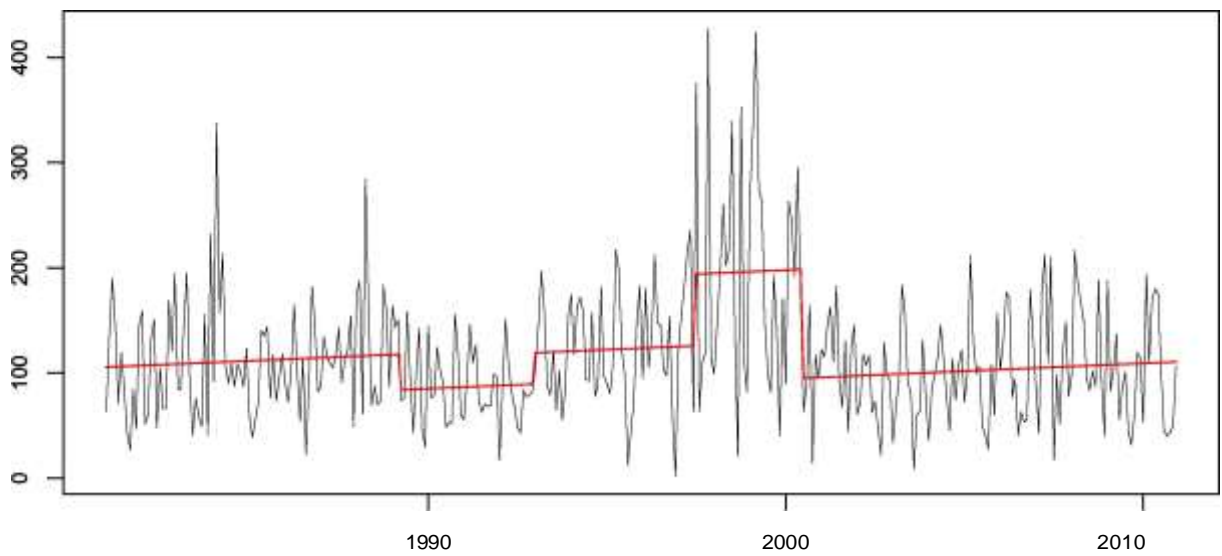
Mean-adjusted base series

M0417 PISCICOLA CHIRIMICHAY

Base anomaly series and regression fit



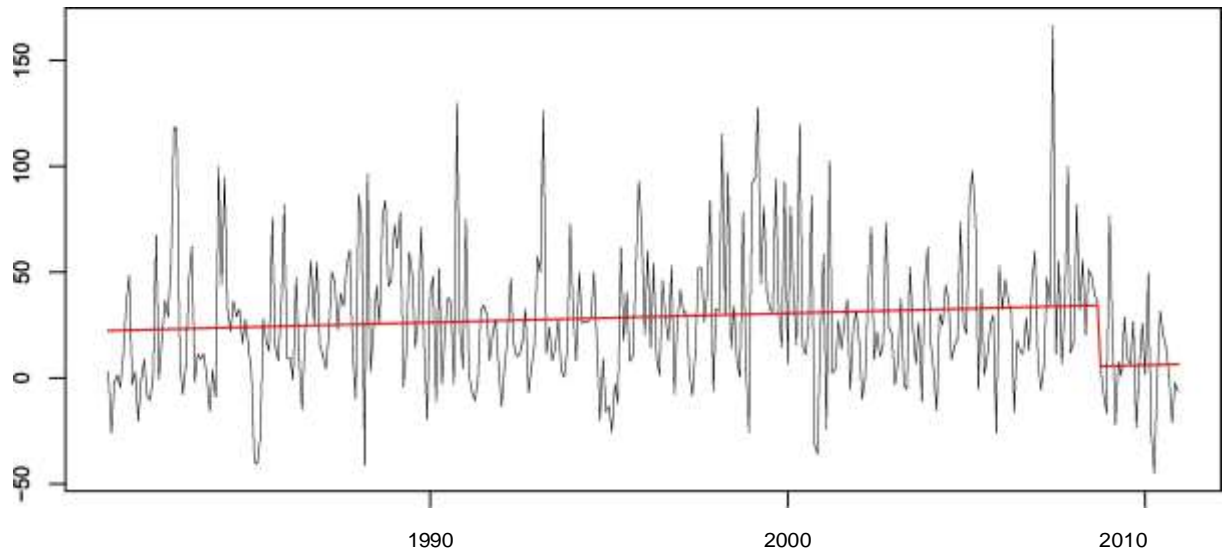
Base series and regression fit



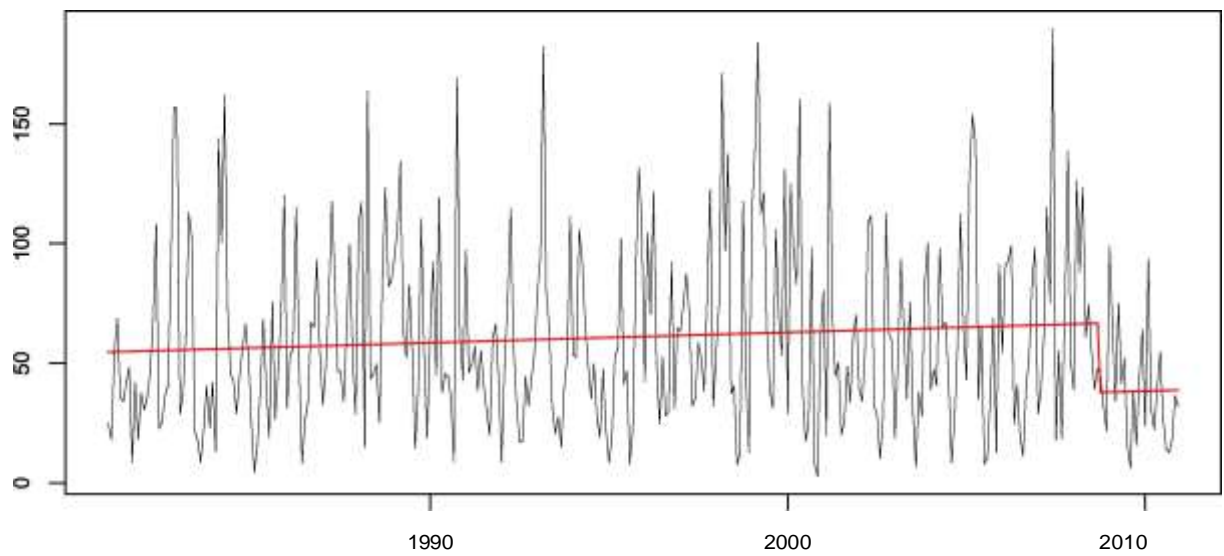
Mean-adjusted base series

M0418 CUMBE

Base anomaly series and regression fit



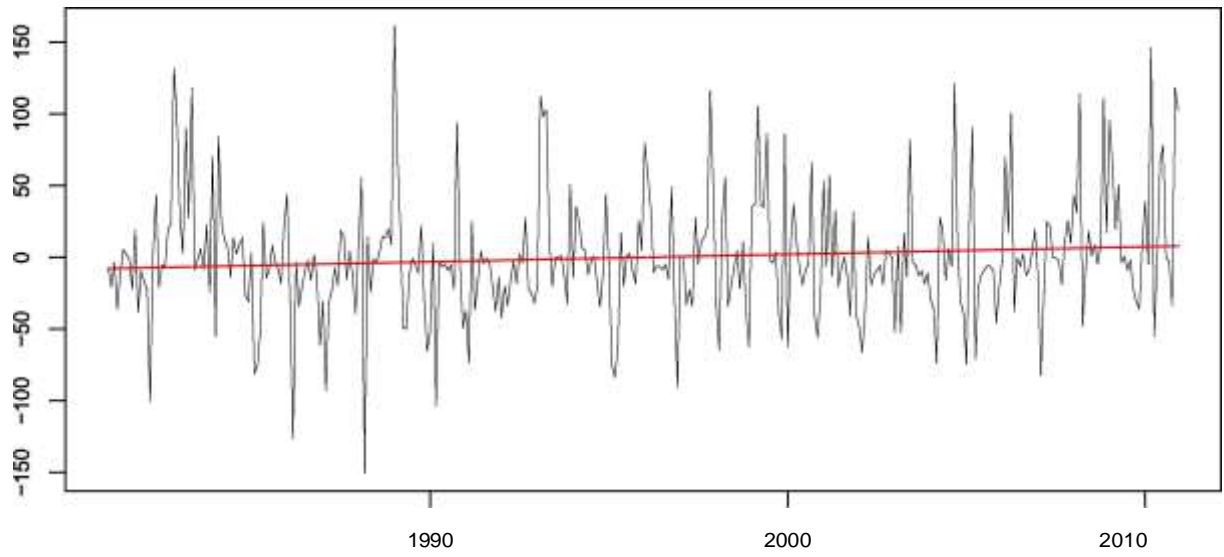
Base series and regression fit



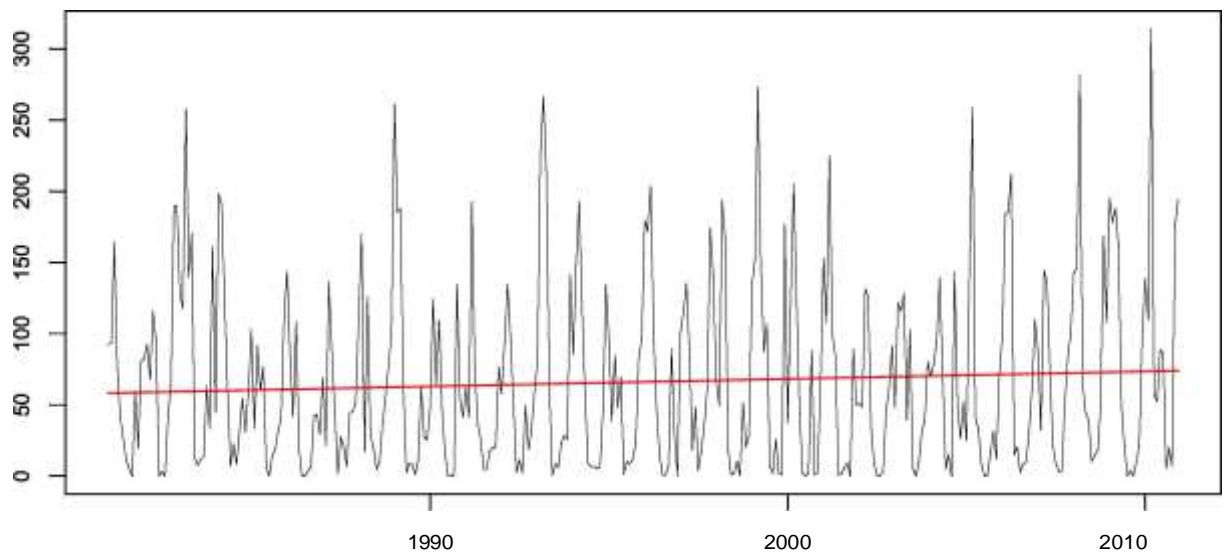
Mean-adjusted base series

M0419 GIRON

Base anomaly series and regression fit

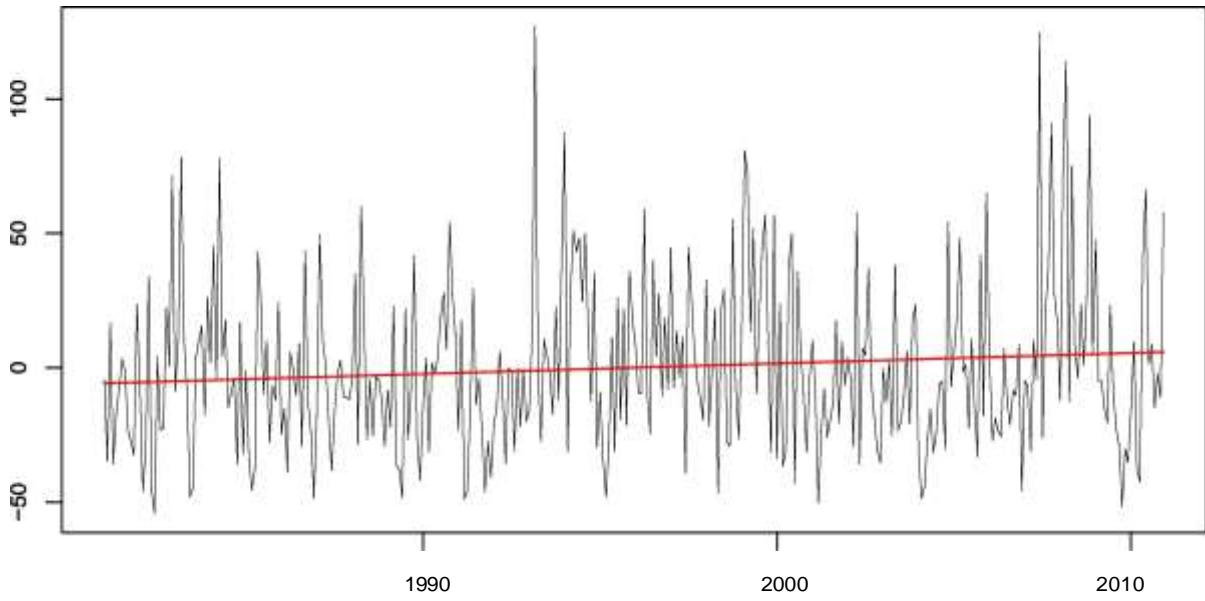


Base series and regression fit

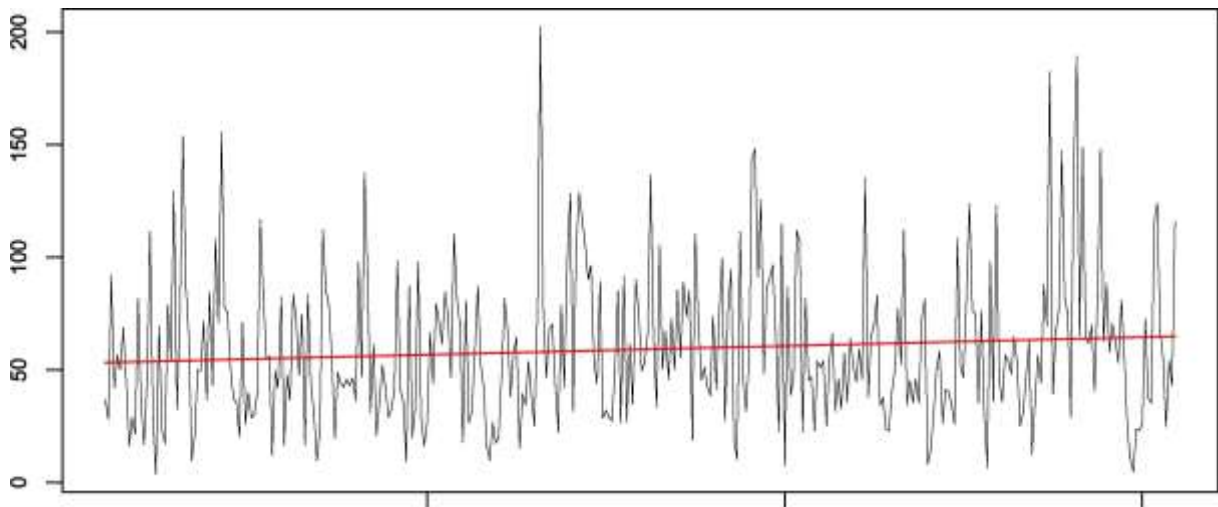


Mean-adjusted base series

M0424 SIGSIG INAMHI

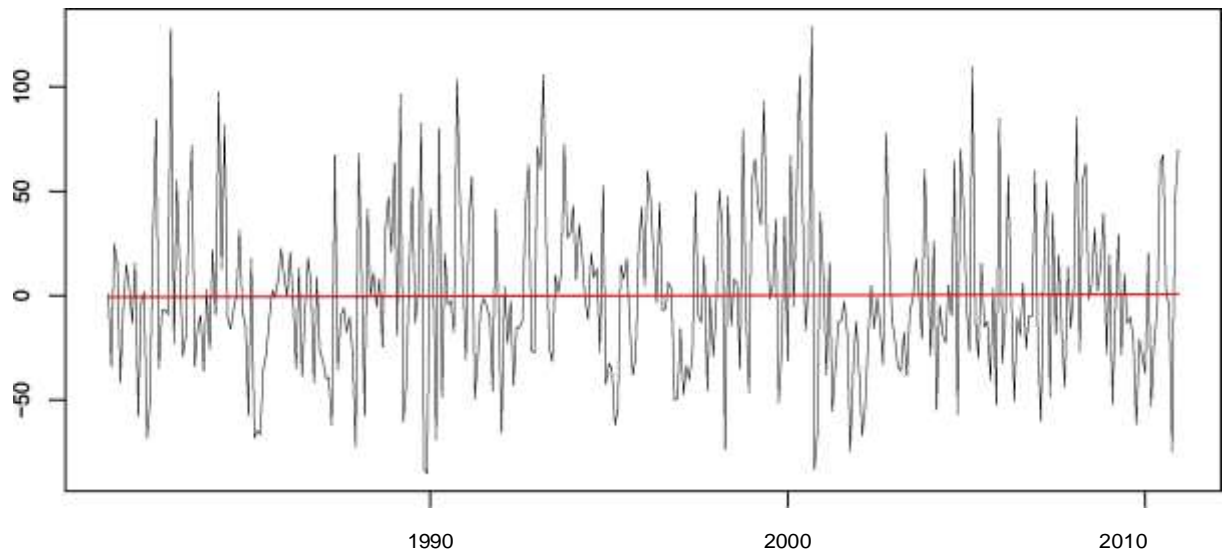


Base series and regression fit

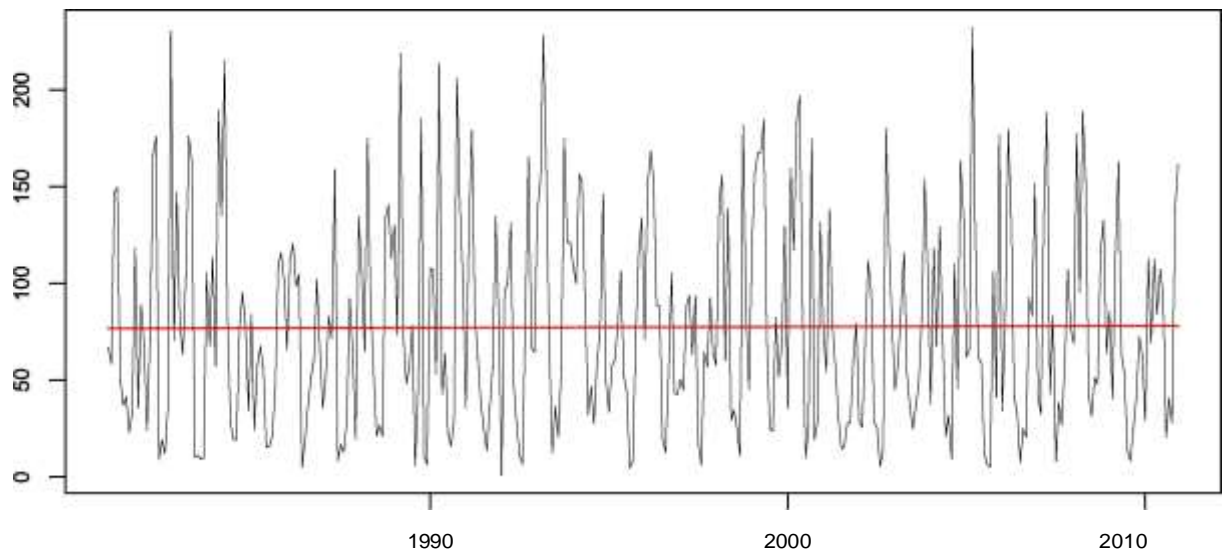


M0426 RICAURTE-CUENCA

Base anomaly series and regression fit

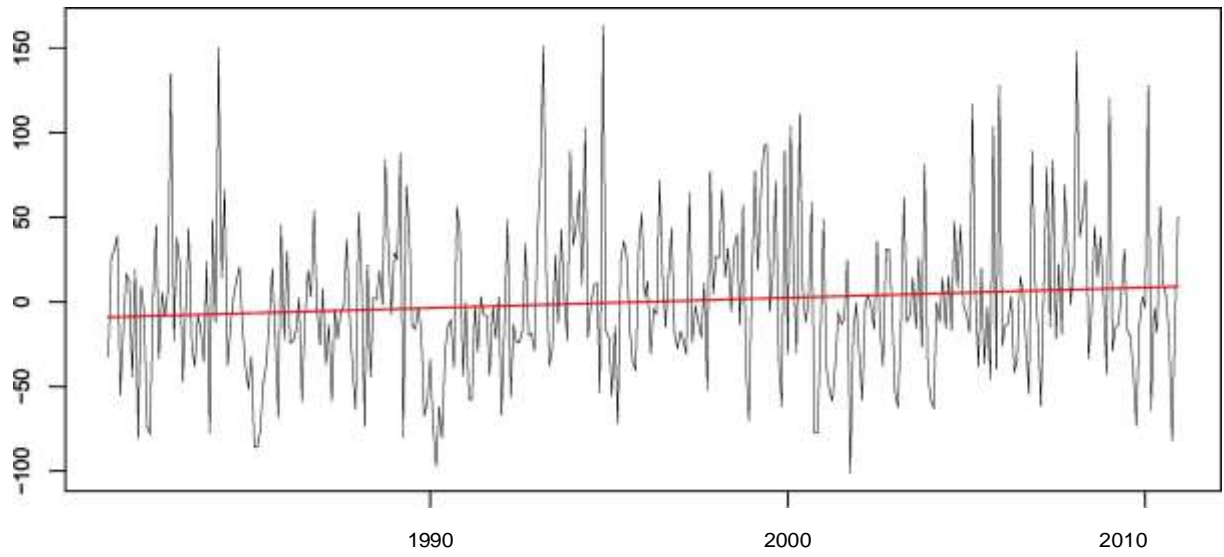


Base series and regression fit

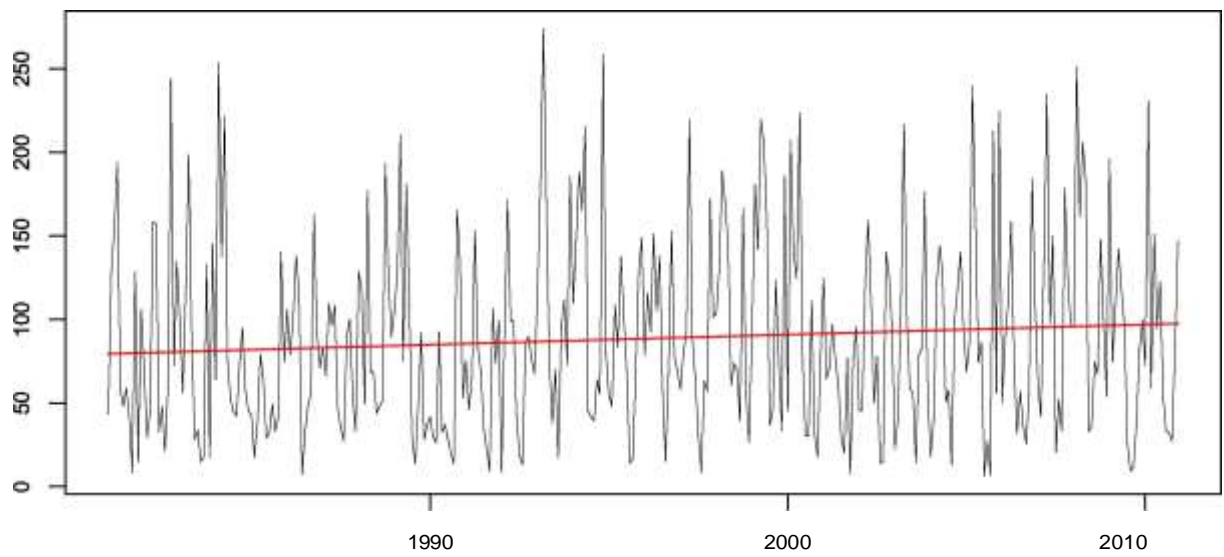


M0427 SAYAUSI MATADERO DJ

Base anomaly series and regression fit

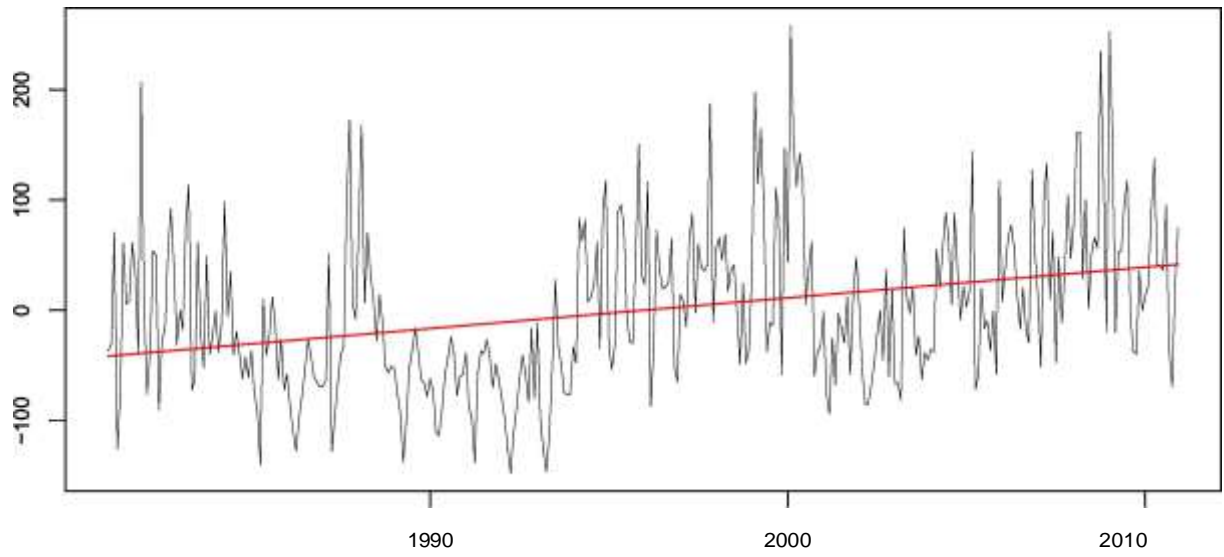


Base series and regression fit

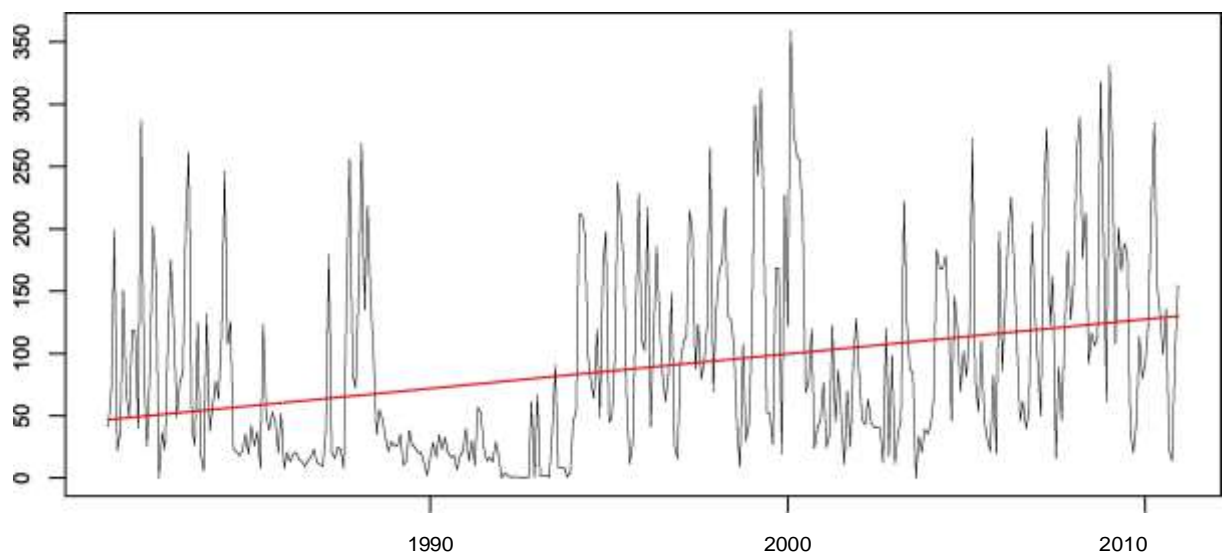


M0429 SURUCUHO LLULLUCHUY

Base anomaly series and regression fit

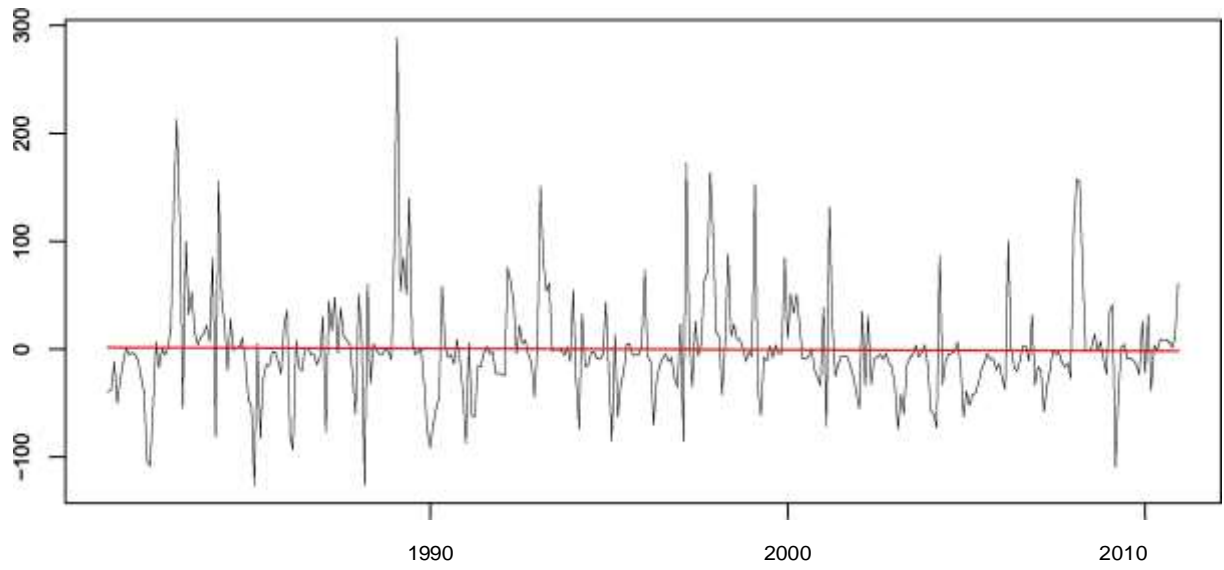


Base series and regression fit

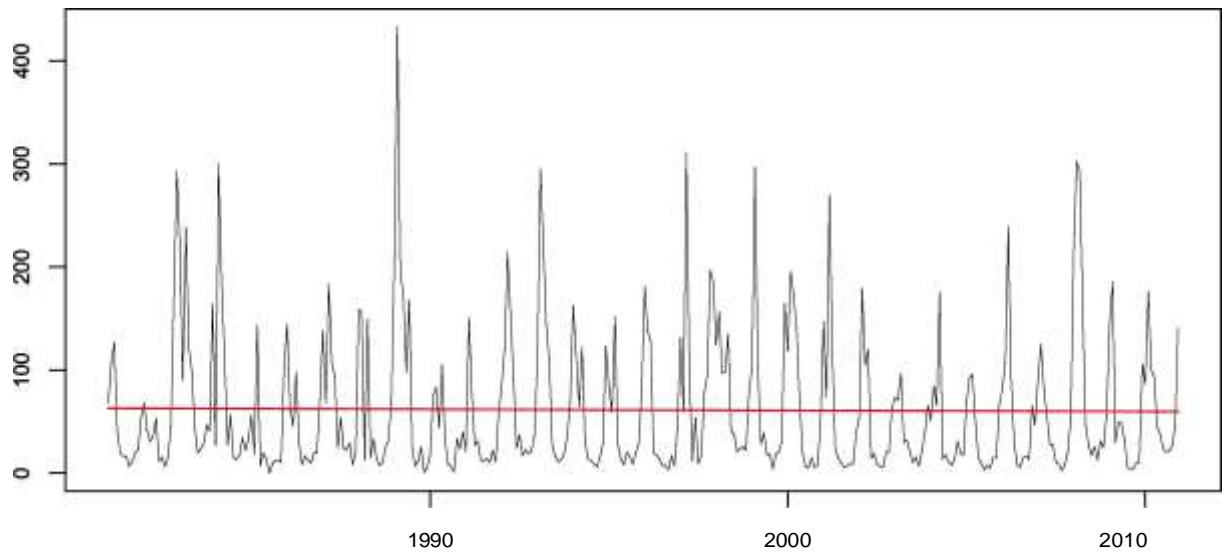


M0481 SEVILLA DE ORO

Base anomaly series and regression fit

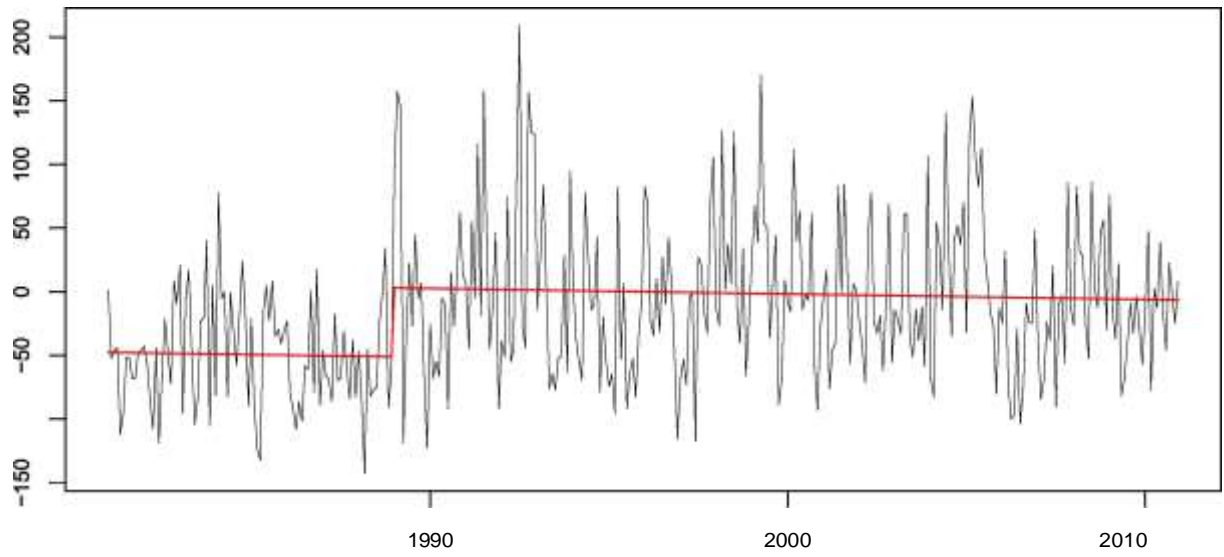


Base series and regression fit

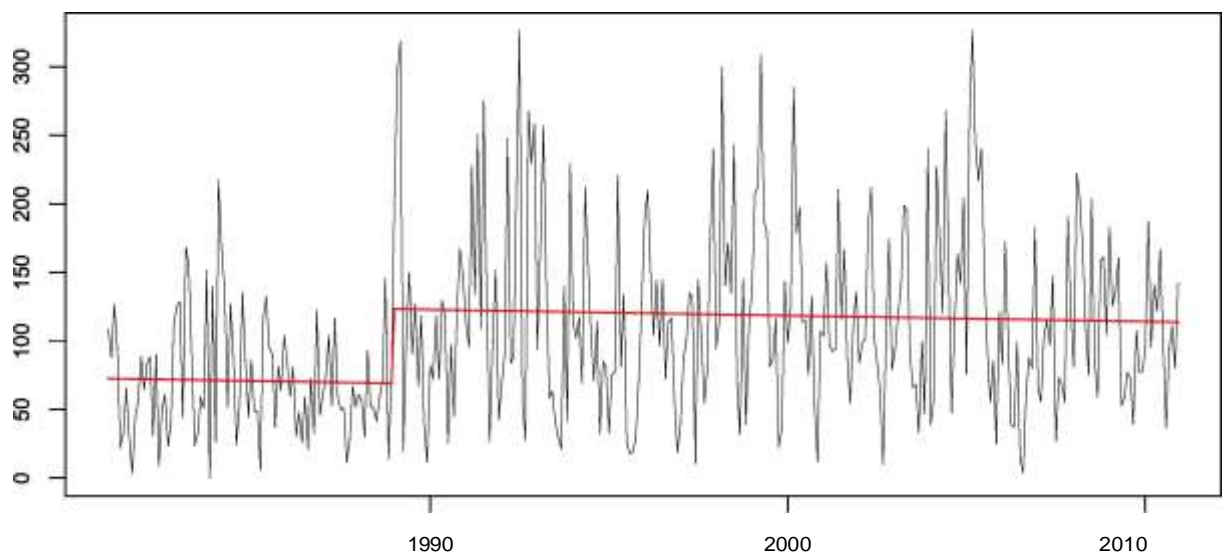


M0432 SAN LUCAS

Base anomaly series and regression fit

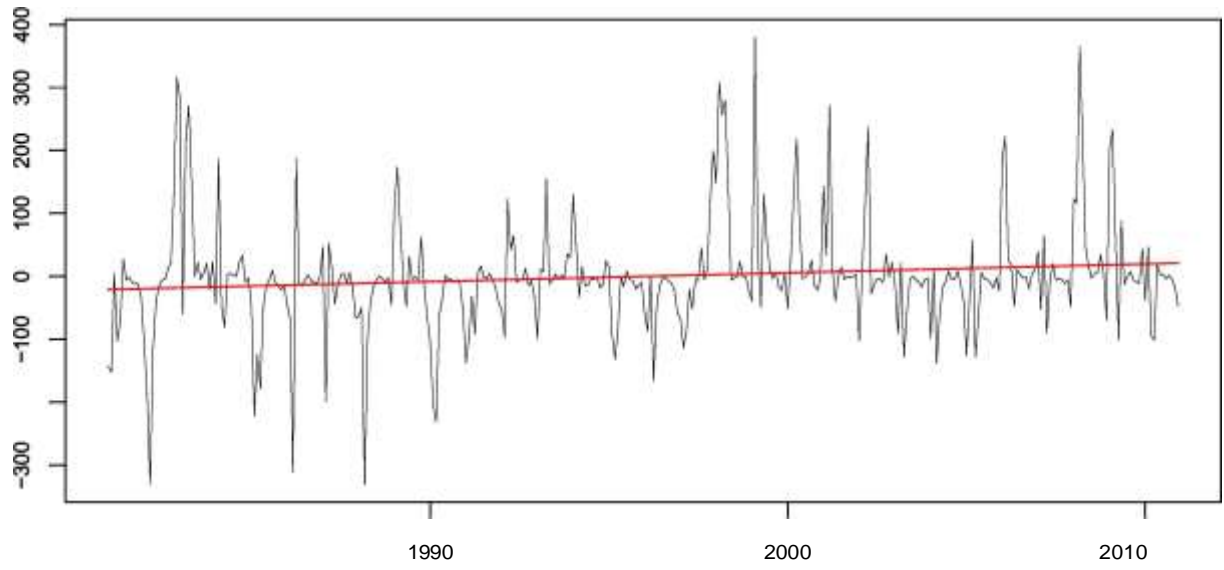


Base series and regression fit

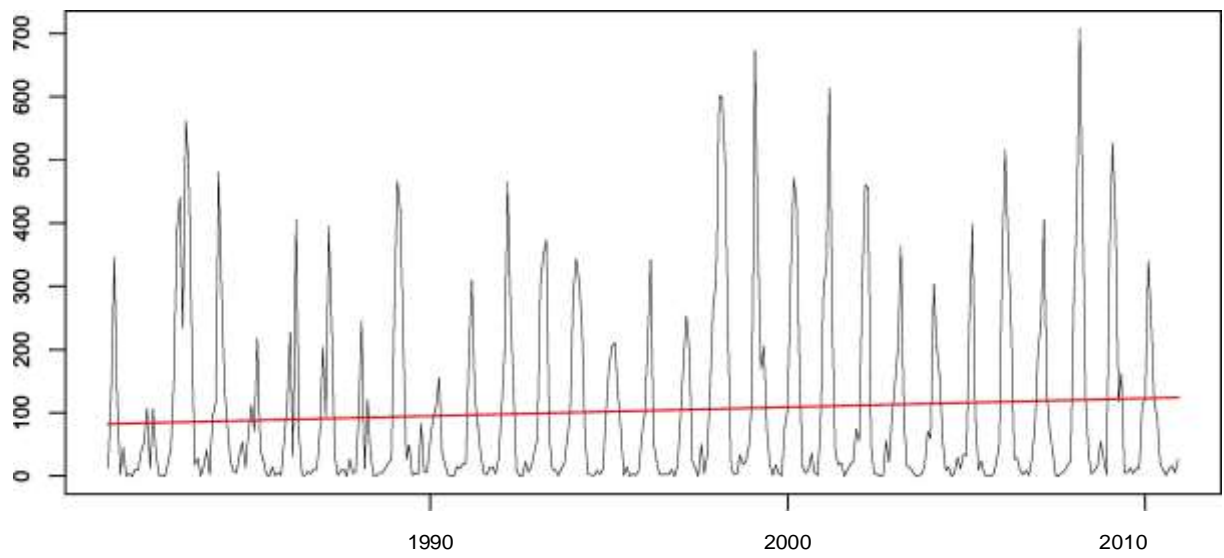


M0434 SOZORONGA

Base anomaly series and regression fit

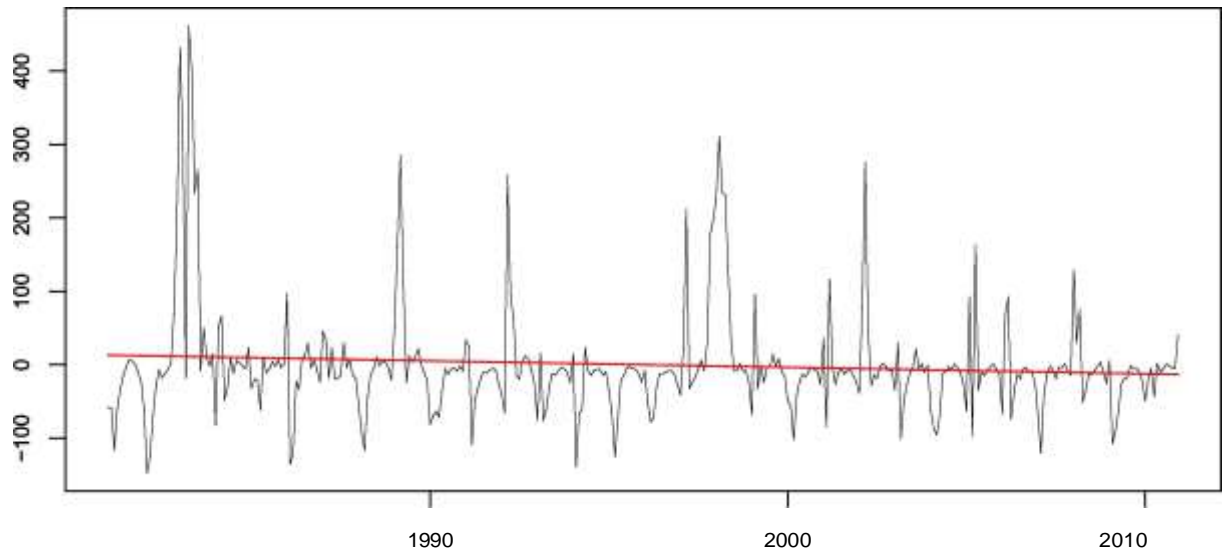


Base series and regression fit

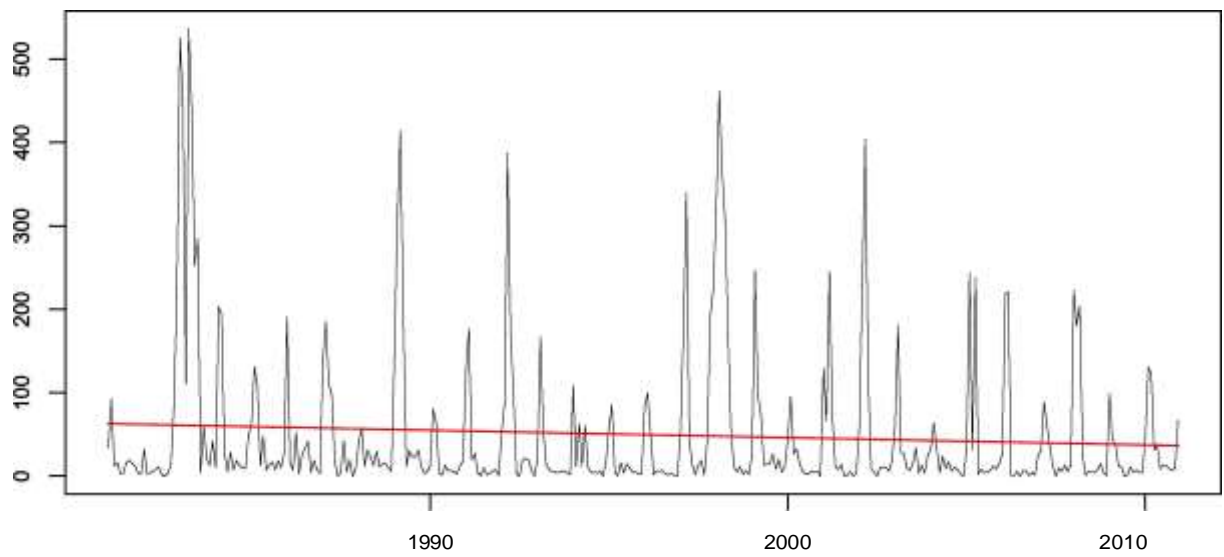


M0453 CHORRILLOS

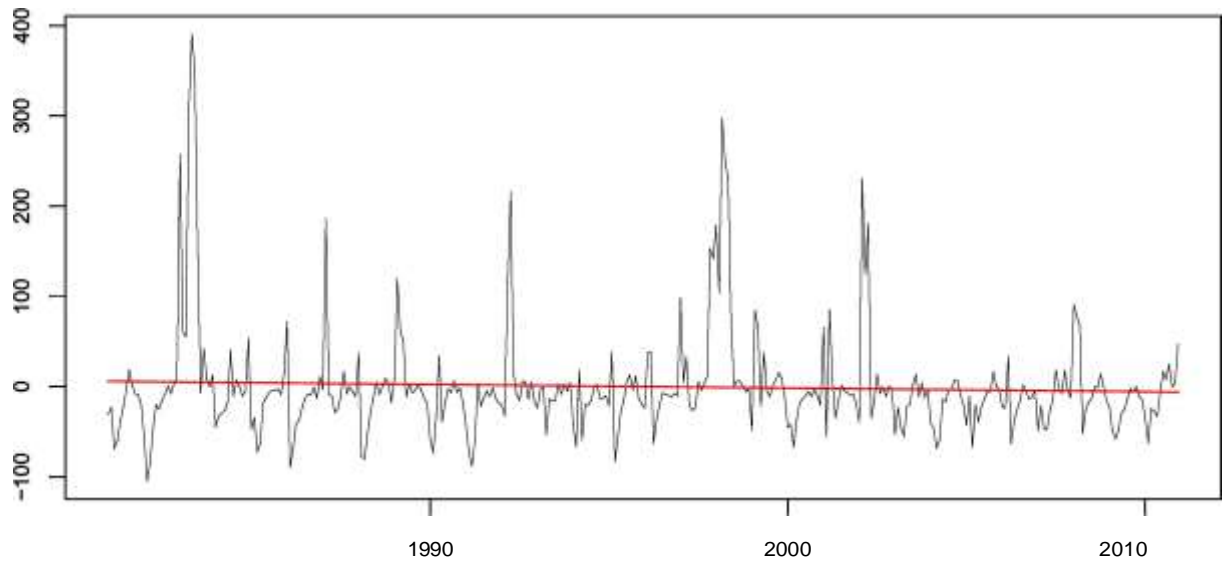
Base anomaly series and regression fit



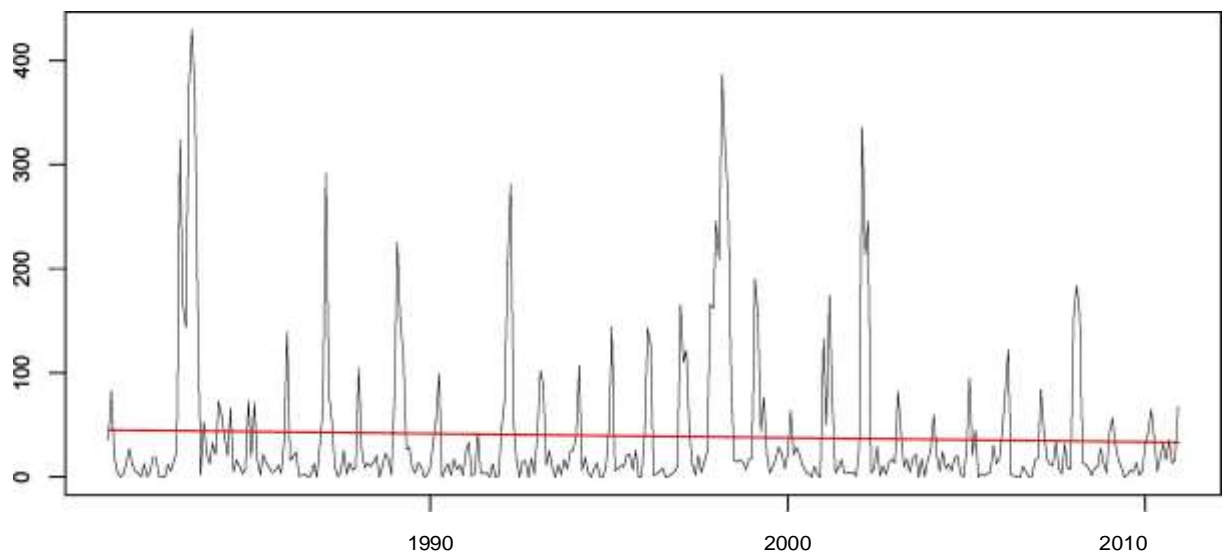
Base series and regression fit



Base anomaly series and regression fit

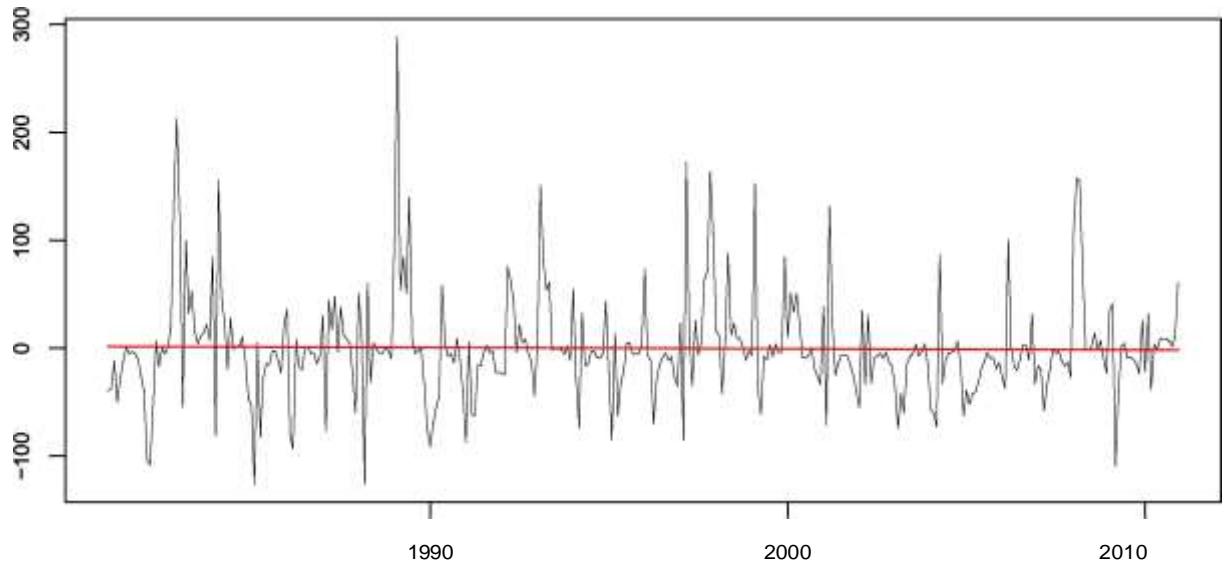


Base series and regression fit

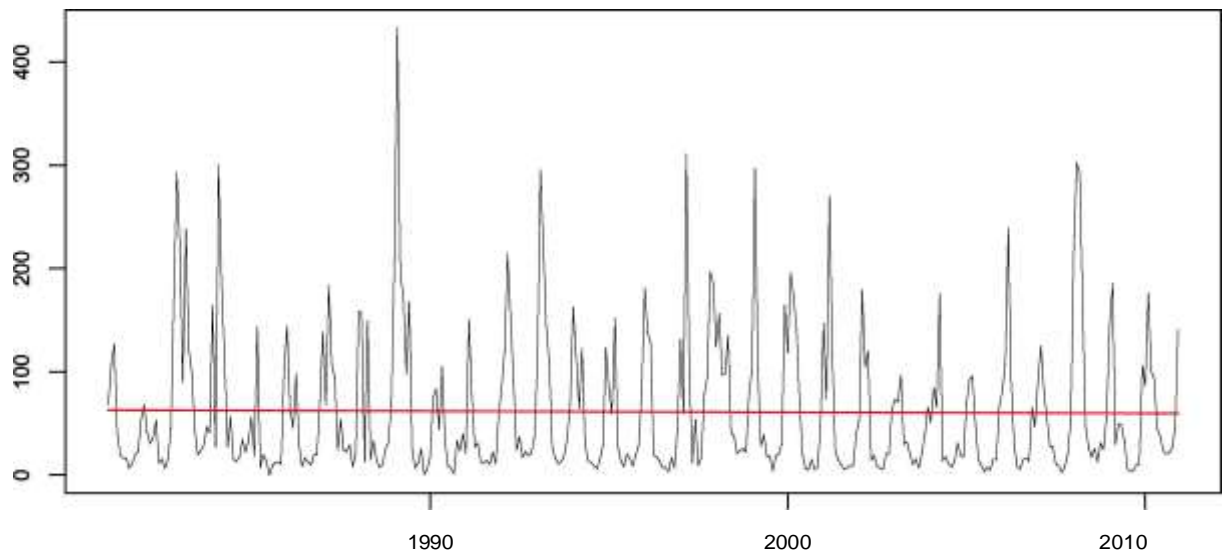


M0481 USHCHIRRUMI

Base anomaly series and regression fit

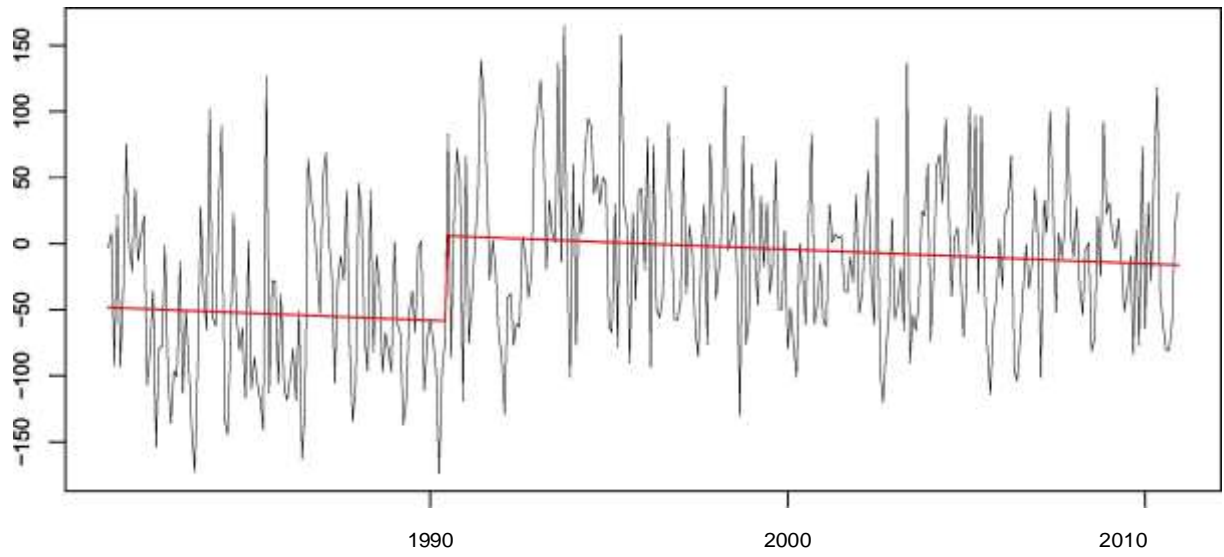


Base series and regression fit



M0497 LOGROÑO

Base anomaly series and regression fit



Base series and regression fit

