



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

Gestión de Recursos Hídricos a través del desarrollo de modelos matemáticos
para predecir la ocurrencia de sequías

Trabajo de Titulación para optar al título de Ingeniero Civil

Autores:

Bonifaz Tene, Bryan Steven
Mendoza Olmedo, Marco Alexander

Tutor:

MgS. Jéssica Paulina Brito Noboa

Riobamba, Ecuador. 2025

DECLARATORIA DE AUTORÍA

Nosotros, Bryan Steven Bonifaz Tene, con cédula de ciudadanía 060566931-6 y Marco Alexander Mendoza Olmedo, con cédula de ciudadanía 060508956-4, autores del trabajo de investigación titulado: Gestión de Recursos Hídricos a través del desarrollo de modelos matemáticos para predecir la ocurrencia de sequías, certificamos que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones expuestas son de nuestra exclusiva responsabilidad.

Asimismo, cedemos a la Universidad Nacional de Chimborazo, en forma no exclusiva, los derechos para su uso, comunicación pública, distribución, divulgación y/o reproducción total o parcial, por medio físico o digital; en esta cesión se entiende que el cesionario no podrá obtener beneficios económicos. La posible reclamación de terceros respecto de los derechos de autor (a) de la obra referida, será de mi entera responsabilidad; librando a la Universidad Nacional de Chimborazo de posibles obligaciones.

En Riobamba, 01 de mayo de 2025.

Bryan Steven Bonifaz Tene

C.I: 060566931-6

Marco Alexander Mendoza Olmedo

C.I: 060508956-4

DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR

Quien suscribe, Jéssica Paulina Brito Noboa catedrático adscrito a la Facultad de Ingeniería, por medio del presente documento certifico haber asesorado y revisado el desarrollo del trabajo de investigación titulado: Gestión de Recursos Hídricos a través del desarrollo de modelos matemáticos para predecir la ocurrencia de sequías, bajo la autoría de Bryan Steven Bonifaz Tene y Marco Alexander Mendoza Olmedo; por lo que se autoriza ejecutar los trámites legales para su sustentación.

Es todo cuanto informar en honor a la verdad; en Riobamba, a los 28 del mes de abril de 2025.



Jéssica Paulina Brito Noboa

C.I: 060397236-5

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación Gestión de Recursos Hídricos a través del desarrollo de modelos matemáticos para predecir la ocurrencia de sequías, presentado por Bryan Steven Bonifaz Tene, con cédula de identidad número 060566931-6 y Marco Alexander Mendoza Olmedo, con cédula de identidad 060508956-4, bajo la tutoría de MgS. Jéssica Paulina Brito Noboa; certificamos que recomendamos la APROBACIÓN de este con fines de titulación. Previamente se ha evaluado el trabajo de investigación y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba 01 de mayo de 2025.

Ing. Nelson Patiño, Mgs.
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE GRADO



Ing. Gabriela Zúñiga, Mgs.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO



Ing Ángel Paredes, Mgs.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO





CERTIFICACIÓN

Que **Bonifaz Tene Bryan Steven** con C.C: **0605669316**, y **Mendoza Olmedo Marco Alexander** C.C: **0605089564** estudiantes de la Carrera **INGENIERÍA CIVIL**, Facultad de **INGENIERÍA** han trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado "Gestión de Recursos Hídricos a través del desarrollo de modelos matemáticos para predecir la ocurrencia de sequías", cumple con el 5 %, de acuerdo al reporte del sistema Anti plagio **COMPILATIO**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 25 de abril de 2025

Mgs. JESSICA BRITO
TUTOR(A)

DEDICATORIA

*Con profundo respeto y sincero agradecimiento,
dedico este trabajo a Dios, por ser mi guía en cada
paso que di.*

*A mi madre **ROSARIO TENE**, le agradezco y le
dedico este escrito por su amor incondicional, por
su paciencia infinita y por confiar en mí incluso
cuando yo mismo dudaba de mis capacidades, cada
palabra, cada sacrificio y cada abrazo suyo han
sido un impulso para llegar hasta acá. La honro
hoy, mañana y siempre, pues en cada logro mío hay
una huella e imborrable de su excelso amor.*

*A mi amada esposa **CAMILA RUALES**, compañera
incansable de vida, gracias por ser mi fuerza en
momentos de debilidad, tu amor, tu apoyo y tu fe en
mí han sido el sostén en cada paso que he dado y el
impulso que me ayudó a levantarme cuando el
cansancio se apoderaba. Te agradezco por caminar
a mi lado, por creer en mis sueños como si fueran
tuyos.*

*A mi princesa **ISABELLA BONIFAZ** tu existencia
dio un nuevo sentido a mis sueños, gracias por ser
mi luz y mi inspiración para nunca rendirme, tu
sonrisa y tu mirada inocente son la razón más
profunda de mi esfuerzo, Cada logro en mi vida
lleva grabado tu nombre en lo más profundo de mi
ser.*

*A la familia **BONIFAS ALTAMIRANO**, con todo
mi cariño y gratitud, dedico estas palabras a
ustedes, que se convirtieron en un pilar fundamental
en mi vida. Gracias por abrirme las puertas de su
hogar y de su corazón, por su apoyo incondicional,
su generosidad y su fe constante en mí. A mis
primos, quienes no solo son parte de esta familia,
sino que para mí son mis hermanos, gracias por su
amor, su complicidad y su apoyo inquebrantable
A mis queridos **AMIGOS**, gracias por su amistad
sincera, por sus risas que aliviaron mis momentos
de estrés. Su compañía ha sido el vivo ejemplo de
que no estamos solos, de que los verdaderos amigos
están allí en los momentos de dificultad y de alegría.*

DEDICATORIA

De manera especial y con una eterna gratitud en mi corazón quiero dedicar este logro a las personas que con un amor incondicional estuvieron apoyándome en esta etapa de mi vida. Fue un proceso difícil que gracias a ustedes se tornó más ameno.

*A mi padre, **Miguel Mendoza** que con su arduo trabajo y esfuerzo ha logrado que nunca me falte nada, me ha brindado su sabiduría, su conocimiento, su experiencia para ser un mejor hombre y su inequívoca fe en que cumpliría con mi objetivo.*

*A mi madre, **Pilar Olmedo**, gracias por tanta paciencia, por esa comprensión inigualable, por esas noches de desvelo en las que se aseguraba de que estuviera bien, por esa preocupación en mi bienestar, pido a Dios que sea así muchos años más.*

*A mis **hermanos**, que con sus consejos me han guiado ha ser una mejor persona y con su valioso ejemplo me han demostrado que pese a las adversidades nada es imposible.*

*A mis **sobrinos**, por sus ocurrencias y su divertida actitud, han hecho especial este proceso.*

*A mis **amigos** que me han demostrado que las personas que te escuchan y te quieren de verdad son pocas.*

Y finalmente dedico este triunfo a las personas que están y estarán en mi vida, a las que ya no están pero fueron un apoyo excepcional y en especial a las que nunca pudieron estar.

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradezco profundamente a la Universidad Nacional de Chimborazo por brindarme la oportunidad de formarme en este espacio de conocimiento y crecimiento.

A los profesores de la universidad, por su inspiración y por estar siempre dispuestos a compartir sus conocimientos, contribuyendo a mi formación académica y profesional.

A mi docente tutora Ing. Jessica Brito por su dedicación, paciencia y guía constante durante todo el proceso.

A mi compañero de tesis Alexander Mendoza por su colaboración y trabajo en equipo. Juntos compartimos tanto los retos como las satisfacciones, y su aportación fue fundamental en este proyecto.

Finalmente, agradezco a los miembros del tribunal de la defensa de tesis por su tiempo, sus observaciones y sus críticas constructivas, las cuales contribuyeron al fortalecimiento de este trabajo.

AGRADECIMIENTO

Con un honor profundo me siento complacido de agradecer a la Universidad Nacional de Chimborazo, por abrirme las puertas en su hogar y formarme como profesional, pero sobre todo como una persona de valor que busca el bien no solo propio sino de la sociedad en general.

A mis profesores que me han brindado su conocimiento y su gusto por la ingeniería civil y han sabido transmitir esa pasión con dedicación y esfuerzo.

A mi docente tutora de este trabajo Ing. Jessica Brito, por su paciencia y dedicación a la hora de guiarnos en la culminación de este proceso.

A mi compañero de tesis Bryan Bonifaz por su valioso aporte en esta difícil fase. Y a los ingenieros miembros del tribunal revisor de tesis, por brindarnos de su tiempo, sus conocimientos y su ayuda para que este trabajo sea lo más pulcro posible.

ÍNDICE GENERAL

DECLARATORIA DE AUTORÍA
DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR
CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL
CERTIFICADO ANTIPLAGIO
DEDICATORIA
AGRADECIMIENTO
ÍNDICE GENERAL
ÍNDICE DE TABLAS
ÍNDICE DE FIGURAS
RESUMEN
ABSTRACT

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	18
1.1 Antecedentes	18
1.2 Planteamiento del problema.....	19
1.3 Justificación	20
1.4 Objetivos	21
1.4.1 Objetivo General.....	21
1.4.2 Objetivos Específicos.	21
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.....	22
2.1 Marco Teórico	22
2.1.1 Gestión de recursos hídricos	22
2.1.2 Consideraciones para la gestión	22
2.1.3 Clasificación sequías.....	22
2.1.4 Índices de sequías	23
2.1.5 Zonas de sequías en ecuador	23
2.1.6 Índice de precipitación estándar	24
2.1.7 Evapotranspiración potencial	25
2.1.8 Estado del arte	25
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA.....	27
3.1 Tipo de investigación.....	27

3.2	Diseño de la investigación	27
3.3	Técnicas de recolección de datos	28
3.4	Población de estudio y tamaño de muestra	29
3.4.1	Población de estudio	29
3.4.2	Tamaño de muestra.....	30
3.5	Método de análisis.....	31
3.5.1	Análisis de consistencia y homogeneidad.....	31
3.5.2	Fórmulas empleadas	32
3.5.3	Análisis de doble masa.....	34
3.5.4	Análisis de regresión lineal múltiple	34
3.5.5	Error cuadrático medio (RMSE)	34
3.5.6	Índice normalizado de precipitación (SPI).....	35
3.5.7	Fórmula general SPI	35
3.6	Índice de precipitación y evapotranspiración estandarizado (SPEI)	35
3.6.1	Fórmula general SPEI.....	35
3.6.2	Coefficiente de eficiencia del modelo de Nash Sutcliffe (NSE)	36
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN		37
4.1	Resultados	37
4.2	Discusión.....	73
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		75
5.1	Conclusiones.....	75
5.2	Recomendaciones	76
BIBLIOGRAFÍA		77
ANEXOS		78

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Clasificación Sequías.....	23
Tabla 2 Clasificación en función al índice SPI.....	25
Tabla 3 Clasificación en función al índice SPEI	25
Tabla 4 Paquetes R Studio.....	31
Tabla 5 Fórmulas Análisis Consistencia De La Media.....	32
Tabla 6 Fórmulas Análisis Consistencia De La Desviación Estándar	33
Tabla 7 Corrección De Los Datos.....	33
Tabla 8 Análisis De Consistencias Estación Mera (INAMHI).....	37
Tabla 9 Análisis De Consistencias Estación Mera (CHIRPS)	40
Tabla 10 Análisis De Consistencias Estación Mera Corregido (CHIRPS).....	41
Tabla 11 Análisis De Consistencias Estación Guamote (INAMHI).....	43
Tabla 12 Análisis De Consistencias Estación Mera Corregido (INAMHI)	44
Tabla 13 Análisis De Consistencias Estación Guamote (CHIRPS)	46
Tabla 14 Análisis De Consistencias Estación Guamote Corregido (CHIRPS).....	47
Tabla 15 Correlación de Pearson de Mera entre la estación terrestre (INAMHI) y satelital (CHIRPS).	58
Tabla 16 Correlación de Pearson de Guamote entre la estación terrestre (INAMHI) y satelital (CHIRPS).	58
Tabla 17 Correlación de Pearson entre SPI y SPEI.	62
Tabla 18 Ecuaciones de la estación de Mera.....	63
Tabla 19 Ecuaciones de la estación de Guamote.....	64
Tabla 20 Coeficiente de Pearson entre resultados observados y pronosticados con las ecuaciones del cantón Mera.....	72
Tabla 21 Coeficiente de Pearson entre resultados observados y pronosticados con las ecuaciones del cantón Guamote.....	72
Tabla 22 Coeficiente de eficiencia (NSE). Mera.....	72
Tabla 23 Coeficiente de eficiencia (NSE). Guamote.....	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Zonas con influencia de sequía en Ecuador	24
Figura 2. Relación entre variable independiente y variable dependiente.....	27
Figura 3. Metodología de trabajo.....	28
Figura 4. Mapa cantón Guamote, provincia de Chimborazo.....	29
Figura 5. Mapa cantón Mera, provincia de Chimborazo.....	30
Figura 6. Serie de tiempo. Mera (INAMHI)	37
Figura 7. Serie de tiempo. Mera (CHIRPS)	39
Figura 8. Serie de tiempo. Mera Corregido (CHIRPS).....	39
Figura 9. Serie de tiempo. Guamote (INAMHI)	42
Figura 10. Serie de tiempo. Guamote Corregido (INAMHI)	42
Figura 11. Serie de tiempo. Guamote (CHIRPS)	45
Figura 12. Serie de tiempo. Guamote Corregido (CHIRPS).....	45
Figura 13. Serie de tiempo. Mera (T.máx).....	48
Figura 14. Serie de tiempo. Mera (T.mín).....	48
Figura 15. Serie de tiempo. Guamote (T.máx)	49
Figura 16. Serie de tiempo. Guamote (T.mín).....	49
Figura 17. Estadística de datos faltantes. R Studio.....	50
Figura 18. Código para relleno de datos. R Studio.....	51
Figura 19. Series de tiempo (Datos existentes). R Studio.....	52
Figura 20. Series de tiempo (Datos completos). R Studio.	53
Figura 21. Figuras precipitación. Mera (INMAHI). R Studio.....	54
Figura 22. Figuras precipitación. Mera (CHIRPS). R Studio.	55
Figura 23. Figuras precipitación. Guamote (INAMHI). R Studio.....	55
Figura 24. Figuras precipitación. Guamote (CHIRPS). R Studio.....	56
Figura 25. Análisis de doble masa entre las estaciones de Mera.....	57
Figura 26. Análisis de doble masa entre las estaciones de Guamote.....	57
Figura 27. Código para cálculo del SPI. R Studio.....	59
Figura 28. Código para cálculo de la EVP y el Balance. R Studio.....	59
Figura 29. Código para cálculo del SPEI. R Studio.....	59
Figura 30. SPI. Mera.....	60
Figura 31. SPEI. Mera.....	60

Figura 32. SPI. Guamote.....	61
<i>Figura 33. SPEI. Guamote.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 34. Código para cálculo de regresión lineal. R Studio.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 35. Gráfico Quantil-Quantil (Q-Q). R Studio.....</i>	<i>63</i>
Figura 36. Serie de tiempo. Mera (1996-1999).	66
Figura 37. Serie de tiempo. Guamote (1994-1997).	66
Figura 38. Mapa de precipitación Mera (1996-1999).	67
Figura 39. Mapa de precipitación Guamote (1994-1997).	68
<i>Figura 40. SPEI de Mera. Observado.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 41. SPEI de Mera. Pronosticado</i>	<i>70</i>
<i>Figura 42. SPEI de Guamote. Observado.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 43. SPEI de Guamote. Pronosticado</i>	<i>71</i>

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Resumen de datos faltantes. R Studio.....	50
--	----

RESUMEN

El agua es un recurso vital e indispensable para el desarrollo de la vida y el progreso de la sociedad, sin embargo, el cambio climático y el aumento de la población han incrementado significativamente los periodos de sequía, afectando la disponibilidad del recurso hídrico. El presente trabajo surge de la necesidad de desarrollar una herramienta que nos permita prever situaciones de escasez del recurso agua y con ello facilitar la gestión del líquido vital. Esta investigación desarrolla un modelo matemático predictivo de sequías en los cantones de Guamote (Chimborazo) y en el cantón Mera (Pastaza), utilizando datos de precipitación y temperatura históricos desde 1986-2021, obtenidos del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) y del Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station Data (CHIRPS). En la investigación se implementó un análisis de consistencia a través del análisis visual gráfico, generando serie de datos de precipitación por cantón. El cálculo se complementó con los índices SPI (Índice Estandarizado de Precipitación) y SPEI (Índice Estandarizado de Precipitación y Evapotranspiración) a partir de los datos homogenizados, en la serie de datos se observa que el año de 1992 es el año con mayor sequía, mientras que el año que presentó mayores precipitaciones en los cantones es el 2011. En los años más recientes de 2020 y 2021 estos índices tienen valores de sequía de hasta -1.2 y de humedad de más de 2. En el modelo matemático resultado del análisis de regresión lineal, se obtuvo ecuaciones por cantón que tienen como constante el año, precipitación, temperatura máxima y mínima; el valor del mes difiere desde enero a diciembre.

Palabras claves: Precipitación, temperatura, SPI, SPEI, sequía, gestión.

ABSTRACT

Water is a vital and indispensable resource for the development of life and the progress of society; however, climate change and population growth have significantly increased periods of drought, affecting the availability of water resources. The present work arises from the need to develop a tool that allows us to foresee water scarcity situations and thus facilitate the management of the vital liquid. This research develops a predictive mathematical model of droughts in the cantons of Guamote (Chimborazo) and Mera (Pastaza), using historical precipitation and temperature data from 1986-2021 obtained from the National Institute of Meteorology and Hydrology (INAMHI) and the Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station Data (CHIRPS). The research implemented a consistency analysis through visual graphic analysis, generating a series of precipitation data by canton. It was necessary to reach the calculation using the SPI (Standardized Precipitation Index) and SPEI (Standardized Precipitation and Evapotranspiration Index) indexes of the homogenized data. The data series shows that 1992 is the year with the most significant drought, while the year with the greatest precipitation in the cantons is 2011. In the most recent years of 2020 and 2021, these indices have drought values of up to -1.2 and humidity of more than 2. The mathematical model from the linear regression analysis obtained equations for each canton with the year, precipitation, maximum, and minimum temperature as constants; the month's value differs from January to December.

Key words: Precipitation, temperature, SPI, SPEI, drought, management.



Firmado electrónicamente por:
JESSICA MARIA
GUARANGA LEMA

Reviewed by:

Mgs. Jessica María Guaranga Lema

ENGLISH PROFESSOR

C.C. 0606012607

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.

1.1 Antecedentes

La gestión efectiva de los recursos hídricos es un desafío crítico en muchas regiones del mundo, especialmente ante la creciente incidencia de eventos extremos como las sequías. Las sequías meteorológicas, caracterizadas por periodos prolongados de precipitación insuficiente, pueden tener impactos devastadores en la agricultura, el abastecimiento de agua potable, la generación de energía hidroeléctrica y los ecosistemas naturales. Estos eventos no solo afectan la disponibilidad de agua, sino que también ponen en riesgo la seguridad alimentaria, la salud pública y el desarrollo socioeconómico de las comunidades afectadas.

En este contexto, la capacidad para predecir la ocurrencia de sequías con precisión y antelación se ha convertido en una herramienta esencial para la planificación y gestión de los recursos hídricos. La predicción temprana de sequías permite a los responsables de la toma de decisiones implementar estrategias de mitigación y adaptación más efectivas, reduciendo así el impacto negativo de estos eventos.

El desarrollo de modelos matemáticos y computacionales para la predicción de sequías ofrece una solución prometedora para abordar este desafío. Estos modelos integran datos climáticos históricos y actuales, aplican algoritmos avanzados y técnicas de inteligencia artificial, y generan pronósticos que pueden guiar las acciones preventivas y correctivas. Sin embargo, la creación de modelos predictivos precisos y confiables requiere una comprensión profunda de los factores que influyen en la ocurrencia de sequías y un enfoque metodológico riguroso para su validación.

La sequía meteorológica es una amenaza insidiosa que debido a su falta de difusión y mitigación de riesgos pasa desapercibida; sin embargo, es uno de los peligros naturales que pueden llegar a ser más costosos y dañinos, llegando a tener una gran variabilidad en el tiempo. La misma se da debido a un déficit continuo de precipitación (Guo et al., 2017). La sequía abarca varias amenazas dependiendo de la aplicación de cada usuario, como la agricultura, ganadería, centrales eléctricas o gestores de recursos hídricos. (OMM, 2012)

El análisis de sequía bajo el índice de precipitación estandarizado (SPI), desarrollado por (McKee et al., 1993), el cual es uno de los más usados para reflejar la condición de sequía y su cálculo se basa en registros de precipitación a largo plazo. (Guo et al., 2017). La información del SPI proviene de estaciones meteorológicas, que en su mayoría están limitadas en cantidad y distribución, para fines de monitoreo. Se trabaja con mapas que detallan la intensidad de la sequía en una zona, obtenidos a partir de puntos de medición y los valores en lugares sin muestrear se pueden calcular a partir de las estaciones existentes. (Jheimy et al., 2017)

El presente trabajo de investigación se centró en el desarrollo y validación de modelos matemáticos para predecir la ocurrencia de sequías como una herramienta clave en la gestión de recursos hídricos. El objetivo de estudio es diseñar modelos que no solo proporcionen predicciones precisas, sino que también sean aplicables en diversos contextos geográficos y

climáticos. A través de este trabajo, se busca contribuir al desarrollo de estrategias de gestión más resilientes y sostenibles, que permitan mitigar los impactos de las sequías y asegurar la disponibilidad de agua para las generaciones presentes y futuras.

1.2 Planteamiento del problema

Las sequías meteorológicas representan uno de los desafíos más significativos para la gestión de recursos hídricos a nivel global. Según la Organización Meteorológica Mundial (WMO), la frecuencia y severidad de las sequías han aumentado en las últimas décadas, exacerbadas por el cambio y la variabilidad climáticos natural (WMO, 2020). Las sequías prolongadas pueden causar graves impactos en la agricultura, reducir la disponibilidad de agua potable, afectar la generación de energía hidroeléctrica y degradar los ecosistemas naturales (FAO, 2017).

La principal problemática presentada es la falta de capacidad de asignación de recursos hídricos para poder satisfacer la demanda de la producción, y esto se debe a la distribución irregular del espacio-tiempo, el desequilibrio entre la distribución espacio-temporal, la distribución anual no coordinada de los recursos hídricos, el desarrollo socioeconómico, el consumo de agua para actividades agrícolas y a la cría de animales, entre otros.

Según la SENAGUA (2016) en el año 1997 la sequía afectó a varias provincias del Ecuador, este fenómeno desencadenó la disminución en el caudal de los cuerpos de agua poco profundos, esto dio como resultado, la escasez de agua potable en las poblaciones de estos sectores.

Por ello es importante destacar que la situación de entrada natural tiene un impacto significativo en el suministro de agua disponible, lo que resulta en sequías frecuentes (Iñiguez Jandry, 2022). Sin embargo, la precisión de las predicciones actuales sigue siendo un desafío, debido a la complejidad de los factores climáticos y no climáticos que influyen en la ocurrencia de sequías (IPCC, 2021).

Los modelos matemáticos ofrecen un enfoque prometedor para mejorar la predicción de sequías. Estos modelos pueden integrar grandes volúmenes de datos históricos y actuales, aplicar técnicas de análisis avanzadas y generar pronósticos precisos (Hao et al., 2018). No obstante, el desarrollo de estos modelos requiere una comprensión profunda de los procesos hidrológicos y climáticos, así como un enfoque riguroso para su validación y adaptación a diferentes contextos geográficos (Mishra & Singh, 2010).

Actualmente, existe una brecha significativa en la capacidad de las autoridades locales y nacionales para predecir y gestionar eficazmente las sequías. Esta brecha se debe, en parte, a la falta de modelos predictivos robustos y a la limitada integración de estos modelos en las políticas de gestión de recursos hídricos (World Bank, 2019). Además, la variabilidad regional en las condiciones climáticas y los usos del suelo presenta un desafío adicional para la aplicación de modelos generalizados (Vicente-Serrano et al., 2012).

La presente investigación busca abordar esta brecha mediante el desarrollo y validación de modelos matemáticos específicos para predecir la ocurrencia de sequías. Este enfoque permitirá mejorar la capacidad predictiva y apoyar la toma de decisiones en la gestión de recursos hídricos, proporcionando herramientas más precisas y adaptadas a las condiciones locales.

En síntesis, la creciente incidencia de sequías y sus impactos adversos subrayan la necesidad urgente de desarrollar modelos predictivos avanzados y precisos. La implementación de estos modelos en la gestión de recursos hídricos puede transformar la manera en que se enfrentan estos desafíos, contribuyendo a la resiliencia y sostenibilidad de las comunidades afectadas.

1.3 Justificación

El desarrollo de un modelo matemático predictivo en el contexto de la ingeniería civil tiene una importancia crucial y un impacto significativo en diversas áreas como la agricultura, la gestión de recursos hídricos y la operación de hidroeléctricas, teniendo en cuenta que estos son efectos directos de las sequías.

En este sentido, los modelos predictivos pueden anticipar los niveles de agua en embalses, ríos y acuíferos, facilitando una distribución adecuada para satisfacer las necesidades de consumo humano, agrícola e industrial, para de esta forma poder planificar el almacenamiento y liberación de agua en los embalses, asegurando un suministro constante y eficiente para la generación de energía, regadío de agua, entre otras.

Esta tesis tiene el potencial de ofrecer herramientas valiosas para ayudar a predecir en que años existe mayor sequía y con ello analizar las afectaciones producidas en las diferentes infraestructuras hidráulicas y con la información obtenida generar un correcto manejo de recursos hídricos a corto y largo plazo.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General.

- Definir los índices de sequía en los cantones de Guamote (Chimborazo) y Mera (Pastaza).

1.4.2 Objetivos Específicos.

- Analizar base de datos de precipitaciones y temperatura con datos terrestres y satelitales para definir zonas en las que existe mayor cantidad de sequía.
- Generar mapas y gráficos en torno a los eventos de sequía con el propósito de generar herramientas tangibles para la toma de decisiones en el correcto manejo del recurso hídrico.
- Desarrollar y validar modelos matemáticos y computacionales para predecir la ocurrencia de sequías en la zona de estudio, con el fin de mejorar la gestión de recursos hídricos y apoyar la toma de decisiones en estrategias de mitigación y adaptación.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.

2.1 Marco Teórico

2.1.1 Gestión de recursos hídricos

Se conoce como Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH) al proceso relacionado de forma directa con la supervisión, administración y el control de sistema para promover un desarrollo, gestión de agua y recursos similares y la tierra, que apareció alrededor de los años 80 con la finalidad de lograr el bienestar económico y social de forma equitativa sin representar un riesgo para los ecosistemas (UNESCO, 2012). Se comenta además que surgió a causa de la constante competencia que existía por poseer un recurso limitado como es el agua, la contaminación y el posible riesgo a futuro de una disminución del recurso hídrico.

2.1.2 Consideraciones para la gestión

Autores como Gárate et al. (2021) afirman que para una adecuada gestión del recurso hídrico se deben seguir una serie de normas para mejorar su gobernabilidad tomando en cuenta la adecuada un modelo participativo que involucre favorablemente a usuarios y planificadores de todo nivel relacionados con varios aspectos fundamentales presentados a continuación:

- Creación de sistemas de gestión
- Definición de roles y tipos de organismos
- Métodos de financiamiento
- Participación de involucrados
- Planificación a largo plazo
- Sistemas de información y monitoreo

Sequía

La sequía es un fenómeno complejo de explicarlo y categorizarlo por lo que darle un enfoque genérico resulta difícil, por ello, es más fácil otorgarle una definición que representa una particularidad del clima.

Sin embargo, Seria (2023) y Velandia (2016) concuerdan que las sequías son fenómenos climáticos extremos que se caracterizan por bajas precipitaciones respecto a periodos normales de meses a años, las cuales afectan negativamente en diferentes aspectos a la humanidad. Mientras que, Changkiang, (2016) mencionan que puede definirse como la ausencia o insuficiencia de proyectos de ingeniería que permitan asignar recursos hídricos y permitir una mayor cantidad de almacenamiento de este.

2.1.3 Clasificación sequías

Autores como Seria (2023) indican que la relatividad de la sequía se determinará en base al punto de vista del investigador, así como del objetivo y efectos de estudio. De esta manera, pueden distinguirse en una primera aproximación, los tipos de sequía presentados (Tabla 1).

Tabla 1
Clasificación Sequías

Tipo De Sequía	Definición	Impacto
Meteorológica	Es la duración variable en función al territorio y estación del año.	• Déficit de precipitaciones considerable. • Ausencia de lluvia.
Hidrológica	Representa la escasez de volumen y caudales de aguas superficiales a largo plazo (años).	• Disminución de escurrimientos. • Descenso de nivel y volumen de cuerpos receptores. • Disminución de nivel de acuíferos.
Socioeconómica	Disponibilidad de agua disminuida hasta el punto de producir daños económicos o personales a la población por escasez de lluvia.	• Sectores afectados por escasez hídrica. • Restricción de suministro de agua.
Agrícola	Se desarrolla cuando la oferta hídrica es escasa para el desarrollo de cultivos	• Impactos en el medioambiente.

Nota. Se presenta la clasificación de las sequías, definiciones e impactos. *Adaptado de:* (Velandia, 2016) y (Seria, 2023)

2.1.4 Índices de sequías

Los índices de sequía son mediciones que permiten evaluar la gravedad, duración, ubicación y momento de una sequía. También sirven para determinar el impacto de la sequía en una región a lo largo del tiempo.

2.1.5 Zonas de sequías en Ecuador

Existen 147 estaciones meteorológicas que presentan los índices de humedad relativa a nivel nacional, donde se observa principalmente que las regiones situadas en la llanura costera occidental y la meseta montañosa de los Andes son aquellas que podrían ser más afectadas por sequía en Ecuador (Figura 1).

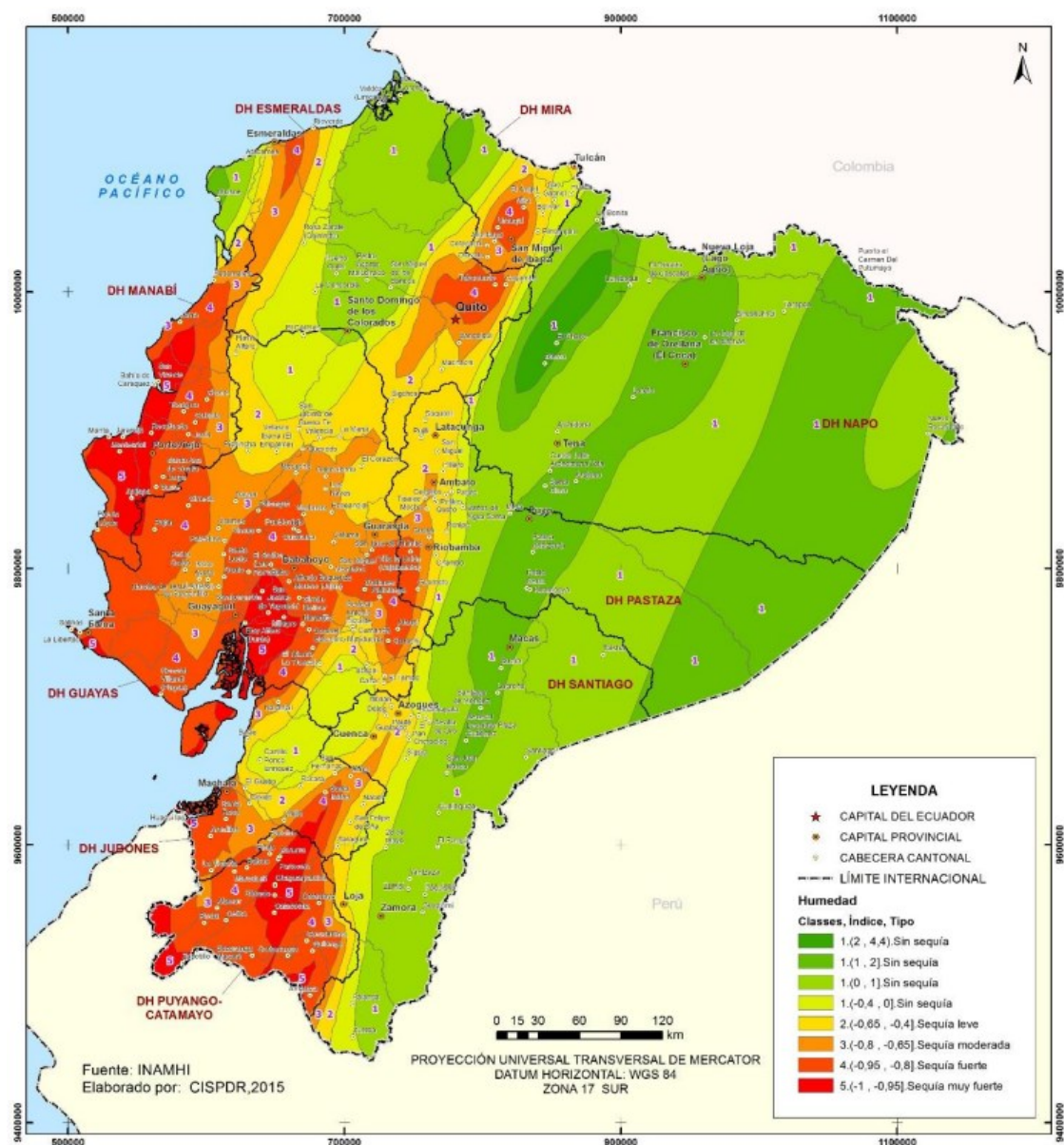


Figura 1. Zonas con influencia de sequía en Ecuador. Recuperado de: (Changkiang, 2016)

Como se puede observar en la Figura (1) existe una escala de colores para determinar aquellas zonas más afectadas por sequías en el país, siendo el color verde aquellas zonas menos afectadas y las rojas las más afectadas, corroborando así lo mencionado anteriormente.

2.1.6 Índice de precipitación estándar

El índice de precipitación estándar es una medida cuantitativa que señala el grado de desviación de la precipitación acumulada en un determinado intervalo con respecto a su promedio histórico de precipitaciones. Para su cálculo, los valores originales de precipitación se ajustan a una distribución, lo que permite expresar el índice en términos de desviaciones estándar. Los valores que se utilizan para el Standardized Precipitation Index, los podemos ver en la Tabla (2).

Tabla 2*Clasificación en función al índice SPI.*

Categoría	SPI
Sequía extrema	-2.0 y menos
Sequía severa	-1.5 a -1.99
Sequía moderada	-1.0 a -1.49
Normal	-0.99 a 0.99
Moderadamente húmedo	1.0 a 1.49
Severamente húmedo	1.5 a 1.99
Extremadamente húmedo	2.0 y más

Fuente: (SPI, 2012)

Mientras que en la Tabla (3) se encuentran los valores que se necesitan para clasificar los resultados del Standardized Precipitation Evapotranspiration Index.

Tabla 3*Clasificación en función al índice SPEI.*

Categoría	SPEI
Sequía extrema	-1.5 y menos
Sequía severa	-1.0 a -1.49
Sequía moderada	-0.5 a -0.99
Normal	-0.49 a 0.49
Moderadamente húmedo	0.5 a 0.99
Severamente húmedo	1.0 a 1.49
Extremadamente húmedo	1.5 y más

Fuente: (Podestá et al., 2020)

2.1.7 Evapotranspiración potencial

La evapotranspiración potencial (ETP) es un concepto que se refiere a la máxima cantidad de agua que puede evaporarse y transpirarse desde una superficie completamente cubierta de vegetación, sin restricciones en la disponibilidad de agua. Este proceso depende exclusivamente de las condiciones climáticas del lugar y momento específicos, como temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar.

2.1.8 Estado del arte

En Ecuador, los déficits de recursos hídricos se presentan más en las zonas Costa y Sierra, presentándose una precipitación anual en la Sierra de 600-3000 mm mientras que en la Costa la precipitación disminuye de 3000 mm a 400 mm, y, finalmente, la región Amazonía al poseer un clima tropical lluvioso y ser caliente-húmedo posee precipitaciones anuales de entre 2500-5000 mm (INAMHI, 2012).

De igual manera, se ha establecido que existen temporadas donde se presentan pocas lluvias y alta demanda de agua a nivel nacional, donde en el caso de la provincia de Pastaza dicho periodo abarca los meses de junio a septiembre (Changjiang, 2016), y, en el caso de Chimborazo se presenta mayor sequía durante el mes de septiembre.

Por otro lado, autores como Changjiang (2016) mencionan que existe un desequilibrio de distribución espacio-temporal entre el desarrollo socioeconómico y la cantidad de recursos hídricos, lo cual afecta a su distribución anual y a la satisfacción de su demanda para los diferentes sectores. Eventos considerables de sequía en el Ecuador entre los años 1964 a 2013 representaron pérdidas de entre 1,7 millones de dólares con una población afectada de 744 665 habitantes. Mientras aumentan los proyectos, disminuye la cantidad de agua para poder asignarse a los recursos hídricos, representando una escasez para uso doméstico y agrícola, además de que, son pocos los datos estadísticos acerca de la sequía en el país, y los disponibles se encuentran en poca cantidad.

Es por ello que, a nivel nacional, es vital una gestión eficiente de recursos hídricos, misma que presenta grandes retos en el ámbito de desarrollo económico, ambiental y debido al gran aumento de demanda de agua direccionado por la institución GIRH y encabezado por la Secretaría del Agua para lograr un mayor aprovechamiento, conservación y así, brindar una adecuada protección del agua (Padrino, 2023).

Además, según el Art. 18, literal d) de la Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua (LORHUyA), se comenta que la Secretaría del Agua tiene la responsabilidad de elaborar el Plan Nacional de Recursos Hídricos por lo que se ha hecho énfasis en mejorar las investigaciones para brindar una mejor resiliencia entorno al cambio climático, y promover iniciativas que no sean gubernamentales para promover la adecuada gestión de este recurso a nivel nacional (Padrino, 2023).

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA.

3.1 Tipo de investigación

La investigación presente tiene un enfoque de tipo cuantitativo, en donde se realizó un análisis estadístico de datos, considerando a esta información de forma objetiva como ciencias exactas basados en números según los resultados obtenidos. Asimismo, el alcance de estudio que se maneja es de tipo descriptivo debido a que se tuvo como principal función observar y especificar las propiedades, características o cualquier fenómeno a través de la recolección de datos de la variable de estudio (Arias,2022). Vemos la relación entre variables en la Figura (2).

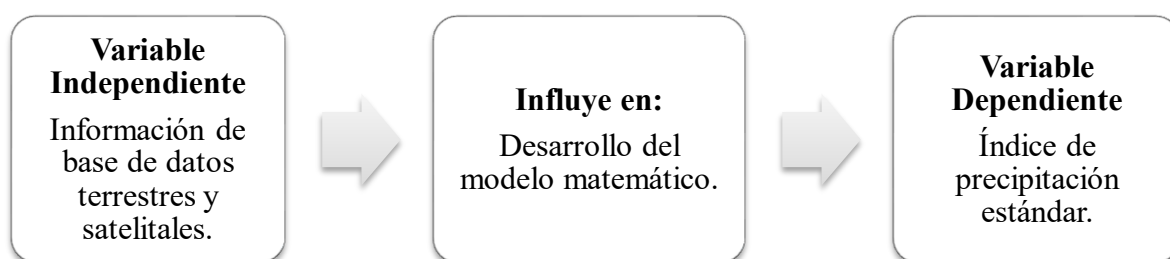


Figura 2. Relación entre variable independiente y variable dependiente.

Elaborado por: Autoría Propia

3.2 Diseño de la investigación

El diseño de la investigación es experimental longitudinal a causa de que se manipulan las variables independientes de estudio y se observan los cambios de la variable dependiente. Se realizó un estudio de las variables en un contexto de cambio, es decir, se observan a lo largo de un periodo de tiempo específico (Arias,2022). A continuación, se muestra la gráfica de la metodología (Figura 3) que se siguió para lograr cumplir con los objetivos planteados en la investigación.

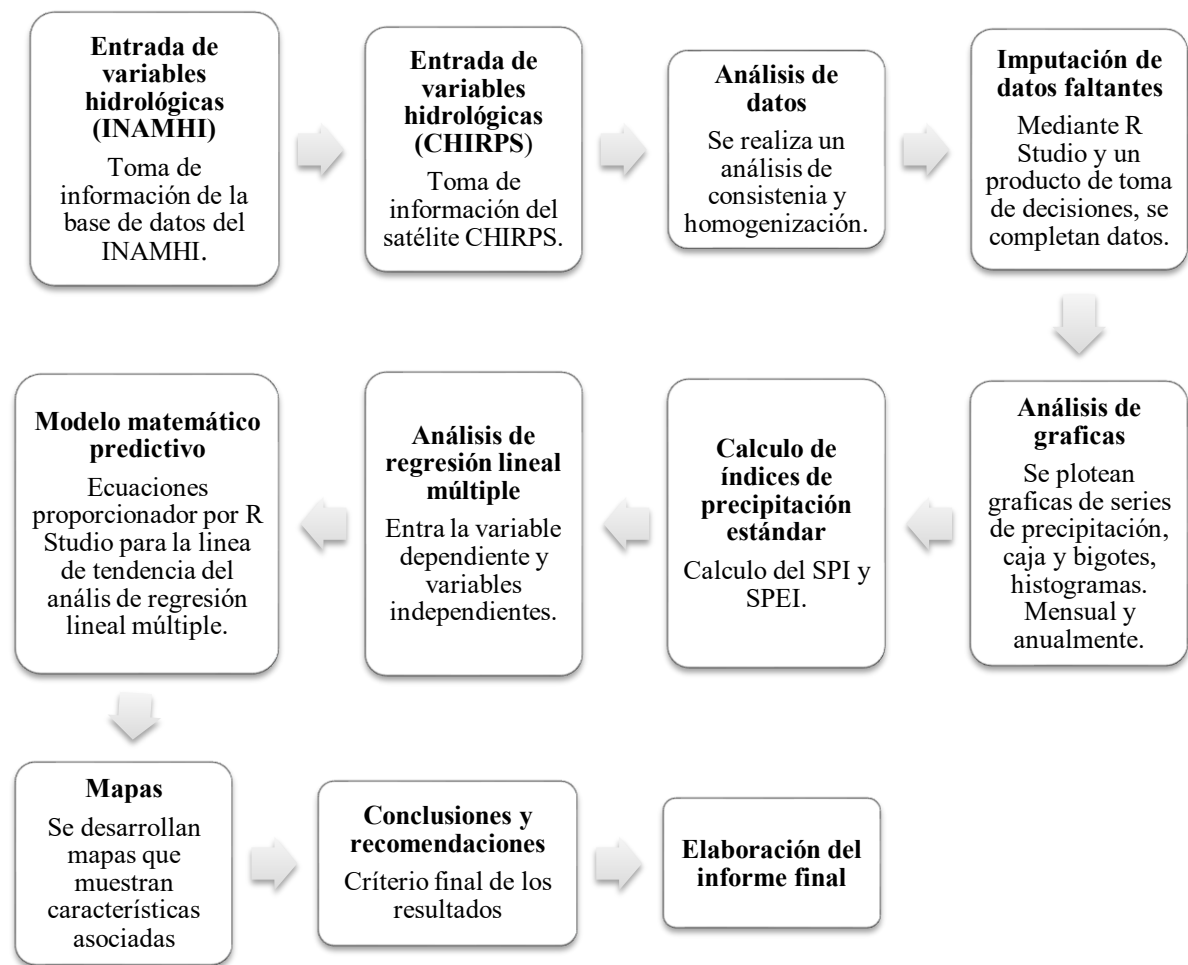


Figura 3. Metodología de trabajo

Elaborado por: Autoría Propia

Como se observa en la Figura (3), el presente estudio inició por la recolección de información en bases de datos como son el INAMHI y el satélite CHIRPS en función a las variables de estudio. Seguidamente, se seleccionaron y calcularon los índices en función a diferentes criterios estadísticos para un ajuste probabilístico que permitan parametrizar los periodos de sequía en función a ciertos indicadores. Posteriormente, se estimaron los datos solicitados para poder realizar modelos matemáticos predictivos en función a las zonas de estudios y hacer una validación de estos.

3.3 Técnicas de recolección de datos

En cuanto a la técnica de investigación que se utiliza, es la técnica de estudios longitudinales, pues esta implica obtener datos a lo largo del tiempo, permitiendo analizar campos y evoluciones de comportamiento. Mientras que, la otra técnica es de datos secundarios, la cual es información recolectada y publicada por fuentes confiables que en este caso provienen de bases de datos en línea y otras fuentes accesibles al público (Javier de Miguel, 2021).

3.4 Población de estudio y tamaño de muestra

3.4.1 Población de estudio

La población que abarca el estudio en el presente trabajo de investigación está conformada por los datos de precipitaciones anuales recopilados de las estaciones de meteorología pertenecientes al Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) y los registros proporcionados por el proyecto satelital CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station Data). Mientras que los datos de temperatura máxima y mínima fueron obtenidos de NASA POWER (Prediction of Worldwide Energy Resources).

, estos datos abarcan zonas geográficas:

- Cantón Guamote: Localizada en sierra ecuatoriana, provincia de Chimborazo, presenta un clima frío típico de zona andinas (Figura 4). Es un área cuya actividad principal es la agricultura, sus actividades productivas dependen de los factores climáticos. Por lo que la sequía representa una amenaza constante y significativa para el progreso del cantón.



Figura 4. Mapa cantón Guamote, provincia de Chimborazo. Recuperado de: (INEC, 2001)

- Cantón Mera: Ubicado en la provincia de Pastaza, región amazónica este cantón tiene un clima húmedo y lluvioso, característico de los ecosistemas selváticos (Figura 5). Aunque su clima difiere marcadamente del de Guamote, Mera también se ve impactado por eventos extremos, como las sequías, que afectan tanto a los recursos naturales como a las actividades económicas de la zona.

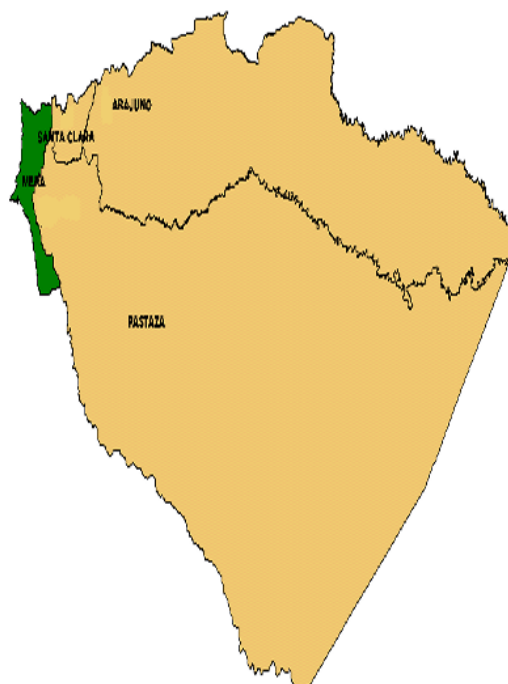


Figura 5. Mapa cantón Mera, provincia de Chimborazo. Recuperado de: (INEC, 2001)

3.4.2 Tamaño de muestra

La muestra de estudio para esta investigación corresponde a los datos climáticos recopilados entre los años 1986 y 2021 en las áreas geográficas de interés: el cantón Guamote (provincia de Chimborazo) y el cantón Mera (provincia de Pastaza). Esta muestra ha sido seleccionada considerando aspectos temporales, espaciales y técnicos relevantes para la investigación.

- **Delimitación temporal**

La selección del periodo 1986-2021 permite abarcar 36 años de datos climáticos históricos, lo que proporciona una base sólida y representativa para el análisis. Este intervalo temporal es suficiente para identificar patrones de variabilidad climática, tendencias de cambio climático y la ocurrencia de eventos extremos como las sequías, que son fundamentales para el diseño de modelos predictivos. El periodo elegido también incluye la influencia de fenómenos climáticos globales como El Niño y La Niña, que afectan significativamente las condiciones meteorológicas en el Ecuador.

- **Tratamiento de la muestra**

Consolidación de datos: Se integraron los registros históricos del INHMHI con los datos satelitales de CHIRPS, para formar una relación en las variables seleccionadas.

Se utilizaron herramientas estadísticas y computacionales para unificar los formatos y corregir inconsistencias en las bases de datos (Tabla 4).

Tabla 4
Paquetes R Studio.

Paquete	Uso
MissForest	Para la imputación de datos faltantes
CorrPlot	Visualizar matrices de correlación de manera gráfica
HydroPlot	Visualizar datos hidrológicos (serie de datos)
SPI	Cálculo índice SPI
SPEI	Cálculo índice SPEI

Nota. Se presentan los códigos de paquetes de R Studio.

3.5 Método de análisis

El método de análisis se aplicará a los datos históricos de precipitación y temperatura, información recopilada de documentos de archivo y fuentes gubernamentales, puesto que la base de datos terrestres se obtendrá del INAMHI (Anexo 1) y las fuentes satelitales serán a través del producto CHIRPS (Anexo 2).

3.5.1 Análisis de consistencia y homogeneidad

Para el análisis de consistencia y homogenización de datos, se utiliza como metodología el libro de Hidrología Analítica de (Villón, 2006).

Para la validación, clasificación, exclusión y análisis de datos se utilizará paquetes de R, los cuales sirven para manejar de manera eficiente una gran cantidad de datos.

- **Correlación de datos**

Se aplicó un análisis estadístico para evaluar la relación entre los datos del INAMHI y CHIRPS. Correlación de Pearson para medir la consistencia y precisión de los datos completados.

Evaluación de posibles sesgos o discrepancias significativas entre ambas fuentes.

- **Modelado de predicción**

Variable: Índice de precipitación estándar.

Se utilizaron métodos estadísticos y algoritmos de aprendizaje automático en R Studio para desarrollar un modelo predictivo de sequías.

Ajuste y validación del modelo utilizando un conjunto de datos históricos.

- **Validación cruzada**

Pruebas de rendimiento del modelo mediante métricas como el coeficiente de determinación (R^2) y el error cuadrático medio (MSE).

3.5.2 Fórmulas empleadas

Se utilizó la prueba “T” de Student para verificar la homogeneidad, utilizando un análisis estadístico de la consistencia de la media, con una probabilidad del 95% o con el 5% del nivel de significación, en función de la media y desviación estándar de las muestras, en función a una serie de fórmulas presentadas. (Tabla 5).

Tabla 5

Fórmulas Análisis Consistencia De La Media

Prueba “T” De Student	
$t_c = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{S_d}$	(1) <i>Donde:</i>
	$\bar{x}_1, \bar{x}_2$ = media de los periodos 1 y 2
$S_d = S_p \left[\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right]^{\frac{1}{2}}$	(2)
	n_1, n_2 = tamaño de las submuestras
$S_p = \left[\frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \right]^{\frac{1}{2}}$	(3)
	S_1, S_2 = desviación estándar de los periodos 1 y 2
Si $ t_c \leq t_t$ (95%) $\rightarrow \bar{x}_1 = \bar{x}_2 \therefore$ No corregir	(4) S_d = desviación de las diferencias de los promedios
	S_p = desviación estándar ponderada
Si $ t_c > t_t$ (95%) $\rightarrow \bar{x}_1 \neq \bar{x}_2 \therefore$ Corregir	(5)
t_t $\rightarrow$ Tabular de la tabla T Student (Anexo 11)	

Nota. Se presentan las fórmulas para determinar la consistencia de la media por medio de la prueba T de Student.

Se utilizó la prueba “F” de Fisher para verificar la consistencia, con una probabilidad del 95% o con el 5% del nivel de significación, considerando los valores de la desviación estándar de las submuestras en función a una serie de fórmulas presentadas. (Tabla 6).

Tabla 6*Fórmulas Análisis Consistencia De La Desviación Estándar*

Prueba “F” De Fisher	
$S_1^2(x) = \left(\frac{1}{n_1 - 1} \sum_{i=1}^{n_1} (x_i - \bar{x}_1)^2 \right)$	(6) <i>Donde:</i> $\bar{x}_1, \bar{x}_2$ =media de los periodos 1 y 2
$S_2^2(x) = \left(\frac{1}{n_2 - 1} \sum_{j=1}^{n_2} (x_j - \bar{x}_2)^2 \right)$	(7) n_1, n_2 = tamaño de las submuestras
$F_c = \frac{S_1^2(x)}{S_2^2(x)}, \text{ si } S_1^2(x) > S_2^2(x)$	(8) S_1, S_2 = desviación estándar de los periodos 1 y 2
$F_c = \frac{S_2^2(x)}{S_1^2(x)}, \text{ si } S_1^2(x) < S_2^2(x)$	(9)
Si $F_c \leq F_t (95\%) \rightarrow S_1(x) = S_2(x)$ $\therefore$ No Corregir	(10)
Si $F_c > F_t (95\%) \rightarrow S_1(x) \neq S_2(x) \therefore$ Corregir	(11)
F_t $\rightarrow$ Tabular de la tabla F de Fisher (Anexo 12)	

Nota. Se presentan las fórmulas para determinar la consistencia de la desviación estándar por medio de la prueba F de Fisher.

Una vez realizados los análisis previos de media y desviación estándar, en caso de necesitar correcciones se emplearon las siguientes fórmulas para obtener valores más consistentes y poder realizar cálculos más precisos. (Tabla 7).

Tabla 7*Corrección De Los Datos*

Corrección De Los Datos	
$X'_{(t)} = \frac{x_t - \bar{x}_1}{S_1(x)} * S_2(x) + \bar{x}_2$	(12) <i>Donde:</i> x_t =valor para corregir
$X'_{(t)} = \frac{x_t - \bar{x}_2}{S_2(x)} * S_1(x) + \bar{x}_1$	(13) $X'_{(t)}$ =valor corregido de saltos

Nota. Se presentan las fórmulas para corregir la consistencia de saltos.

3.5.3 Análisis de doble masa

Según la metodología propuesta por Villón, 2006, “el análisis de doble masa permite tener confiabilidad en los datos para poder analizar la consistencia respecto a errores dentro el proceso de obtención, el mismo se obtiene a partir de plotear en el eje de las abscisas los acumulados, donde se determina la mayor confiabilidad mientras menos valores de quiebre existan”

El propósito principal de este tipo de análisis se basa en conocer si los errores son a causa de fenómenos naturales o a su vez, si los mismos fueron ocasionados por errores sistemáticos para así, determinar aquellos rangos de periodos con poca confiabilidad.

3.5.4 Análisis de regresión lineal múltiple

Se ha empleado en el presente trabajo la técnica estadística del análisis de regresión lineal múltiple donde se toman en cuenta más de dos variables para cuantificar la relación de la variable dependiente y las independientes.

El modelo nos permitió predecir la única variable dependiente en función de las independientes, tomando en consideración la siguiente fórmula.

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_kX_k + u \quad (14)$$

Donde:

$b_1, b_2, \dots, b_k$ = magnitud del efecto de variables independientes sobre la dependiente Y

b_0 = término constante del modelo

u = error del modelo

3.5.5 Error cuadrático medio (RMSE)

El error cuadrático medio es el método común para realizar la medición de calidad de ajuste del modelo estadístico y análisis de regresión, para lo cual en la presente investigación se empleó la fórmula mostrada a continuación:

$$RMETRO\ S_{mi} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{norte} (y_i - \hat{y})^2}{norte}} \quad (15)$$

Donde:

y_i = i-ésima observación de y

$\hat{y}$ = valor predicho dado el modelo

Una vez obtenidos los resultados empleando la ecuación mostrada anteriormente, se buscó obtener valores cercanos al 0, lo que indicaría un ajuste adecuado de los datos sin respuestas que difieran sustancialmente.

3.5.6 Índice normalizado de precipitación (SPI)

El índice normalizado de precipitación (SPI) es un índice sencillo de calcular, para la determinación del índice de la sequía en diferentes zonas como es en el caso de Mera y Guamote, estudiados en la presente investigación, y cuyo único parámetro requerido para el cálculo es la precipitación. Por otro lado, el SPI permitió cuantificar el déficit de precipitación en varias escalas temporales estableciendo una clasificación para establecer la sequía o humedad de la zona.

3.5.7 Fórmula general SPI

$$SPI = \frac{X - \mu}{\sigma} \quad (16)$$

Donde:

X = precipitación acumulada en un período determinado (mensual, trimestral, anual)

μ = media de la precipitación en el mismo período

σ = desviación estándar de la precipitación

3.6 Índice de precipitación y evapotranspiración estandarizado (SPEI)

Este índice es similar al SPI, con la diferencia de que el mismo, incorpora el efecto de la evapotranspiración, misma que representa una gran influencia en la sequía y que utiliza el parámetro de balance, al tener incorporado muchos parámetros como temperatura, humedad de aire, entre otros, para la evapotranspiración.

De igual manera, posee muchos métodos de cálculo, para lo cual, en la presente investigación se empleó el método de Hargreaves. Debido a que es eficiente en el cálculo empleando solo medias mensuales tanto de temperaturas máximas y mínimas, así como de la radiación.

3.6.1 Fórmula general SPEI

Similar al cálculo del SPI. Pero con el uso del **Balance Hídrico**.

$$D = P - ETP \quad (17)$$

D = déficit/excedente hídrico en un período determinado (mensual, trimestral, anual)

P =precipitación en el mismo período

ETP = es la evapotranspiración potencial en el mismo período

D se ajusta a una distribución probabilística, para convertirla en una distribución Normal.

$$SPEI = \frac{D - \mu D}{\sigma D} \quad (18)$$

X = D dato convertido.

μ =media de D

σ = desviación estándar de D

3.6.2 Coeficiente de eficiencia del modelo de Nash Sutcliffe (NSE)

Para la validación del modelo de predicción se utilizará el coeficiente de eficiencia del modelo (NSE), estadística normalizada que se utiliza específicamente para evaluar el desempeño de un modelo de predicción de los datos observados y los simulados, se encarga de comparar la varianza residual del modelo con los datos observados.

Este coeficiente puede variar de menos infinito a 1. Un ajuste perfecto del modelo a los datos observados produce un NSE de 1, lo que indica una coincidencia completa entre los valores simulados y observados. Un NSE de 0 sugiere que las predicciones del modelo son tan precisas como si se utilizara simplemente la media de los datos observados, mientras que los valores negativos indican que la media de los datos observados proporciona mejores predicciones que el modelo. (*Calculadora Del Coeficiente de Eficiencia Del Modelo Nash Sutcliffe*, n.d.)

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (OBS_i - SIM_i)^2}{\sum_{i=1}^n (OBS_i - \overline{OBS})^2} \quad (19)$$

Donde:

OBS_i = Valor de observación

SIM_i = Valor de pronóstico

OBS = Promedio de los valores de observación

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Resultados

Análisis de consistencia y homogenización (precipitación)

Destacando la falta de datos de las estaciones terrestres y la notable falta de homogeneidad en la serie de datos históricos, se comprobó y corrigió en caso de ser necesario los valores de precipitación. Para esto se utilizó la metodología de Máximo Villón Béjar, el capítulo 8 que trata sobre el análisis de consistencia. (Villón, 2006)

Estación Mera (INAMHI)

Como se puede observar (Figura 6), la serie de datos presentado por los datos del cantón Mera obtenidos por la base de datos del INAMHI, se ha dividido el análisis en dos periodos de tiempo, donde se observa que no existe gran diferencia entre los picos, por lo que, a partir de los valores mostrados se procedió a realizar un análisis de consistencias para verificar que exista una homogeneidad entre los mismos.

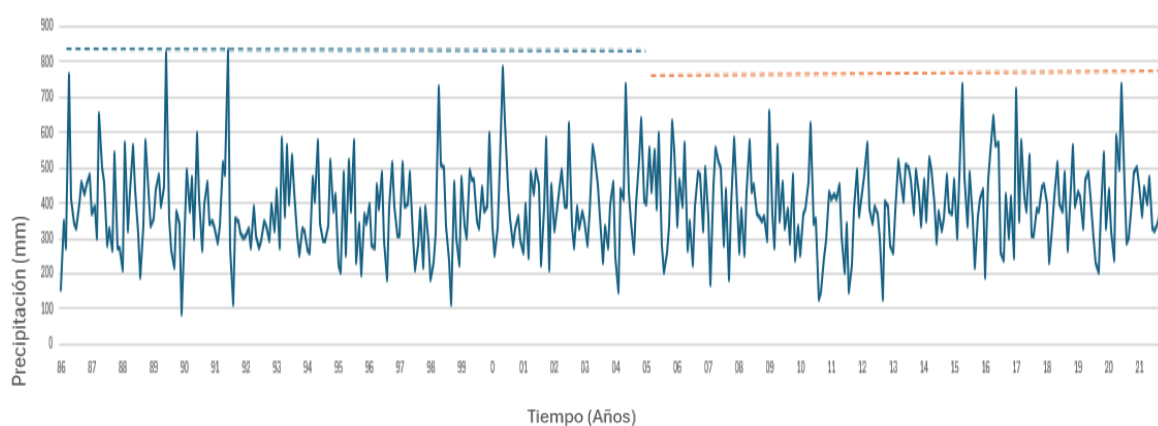


Figura 6. Serie de tiempo. Mera (INAMHI)

Elaborado por: Autoría Propia

A partir de los datos obtenidos en el INAMHI para el cantón Mera, se ha realizado el análisis de consistencias, en función a los periodos establecidos en la serie de tiempo (Figura 6), para poder comprobar si existe homogeneidad o se deben realizar correcciones en los mismos (Tabla 8).

Tabla 8

Análisis De Consistencias Estación Mera (INAMHI)

ESTACIÓN MERA (INAMHI)			
IDENTIFICAR Y ANALIZAR PERIODO A CORREGIR			
PERIODO	1	PERIODO	2
Tamaño de la muestra (n1)	227	Tamaño de la muestra (n2)	188
Media de la muestra (x1)	380,968	Media de la muestra (x2)	396,577

Desviación estándar (S1)	125,859	Desviación estándar (S2)	117,708
Grados de libertad (GL1)	226	Grados de libertad (GL2)	187

PRUEBA "T" DE STUDENT

RESULTADOS

Desviación estándar ponderada	Sp=	122,236
Desviación de las diferencias de los pro.	Sd=	12,054
Cálculo del T, calculado (Tc)	Tc=	1,295
Grado de Libertad	GL=GL1+GL2	413
Prob. del 95%, nivel de signifi. del 5%	α =	5%
Cálculo del valor crítico de t, tabular Tt	Tt=	1,966

|Tc|= 1,29

<

Tt=1,97

Homogéneo

PRUEBA "F" DE FISHER

RESULTADOS

Cálculo del F, calculado (Fc)	1,143
Cálculo del F tabular (valor crítico de Ft)	1,261

Fc= 1,14

<

Ft=1,26

Consistente

NO SE NECESITA REALIZAR UN AJUSTE. (LOS DATOS SON HOMOGÉNEOS Y CONSISTENTES)

Nota. Se presenta el análisis estadístico para determinar consistencia y homogeneidad en el cantón Mera (INAMHI)

Como se pudo observar (Tabla 8), en los periodos establecidos entre P1= 1986-2004 y P2=2005-2021 no se debe realizar un ajuste debido a que los datos son homogéneos y consistentes, al aplicar la metodología establecida.

Por otro lado, se presenta en la Figura (7), la serie de tiempo para los datos del cantón Mera obtenidos por la base de datos del CHIRPS, y además en la Figura (8) se puede observar la serie de tiempo final a partir a las correcciones de datos.

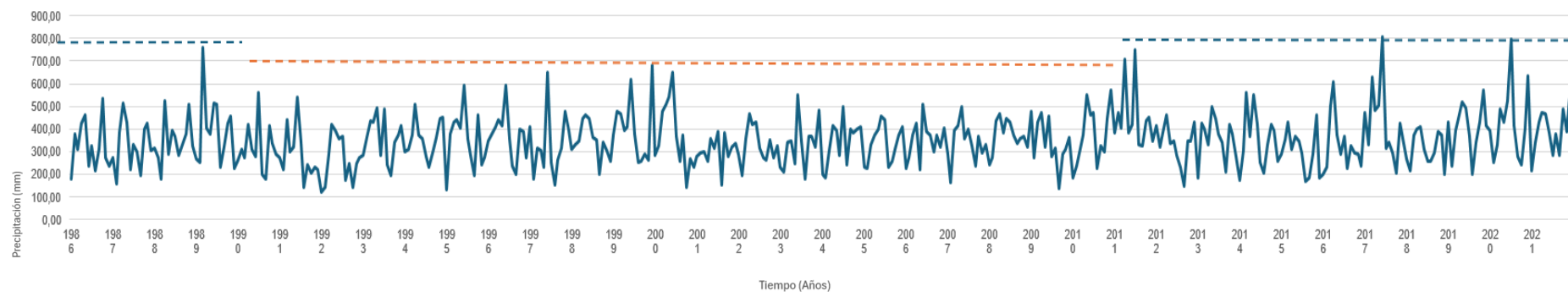


Figura 7. Serie de tiempo. Mera (CHIRPS)

Elaborado por: Autoría Propia

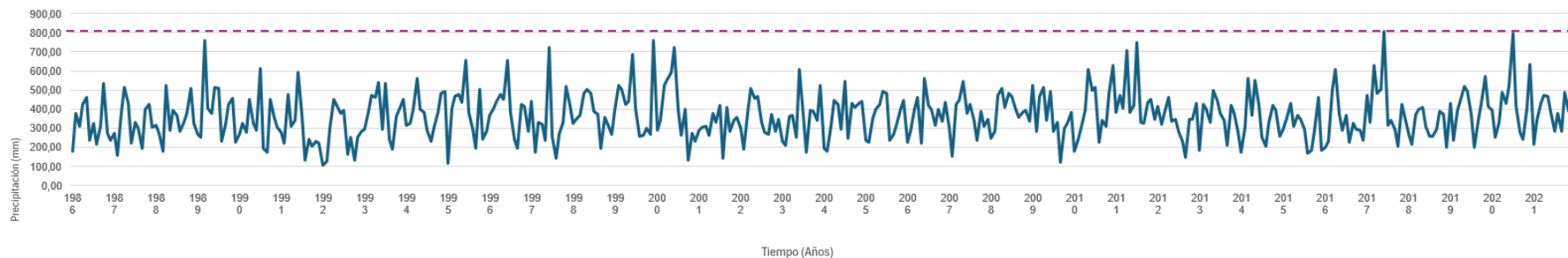


Figura 8. Serie de tiempo. Mera Corregido (CHIRPS)

Elaborado por: Autoría Propia

En la Figura (7), la serie de tiempo presentado por los datos del cantón Mera obtenidos por la base de datos del CHIRPS, se ha dividido el análisis en dos periodos de tiempo, donde se nota una significativa diferencia entre los picos, y, a partir de un posterior análisis de consistencias se logró modificar datos para lograr una mejor consistencia donde se observa Figura (8) que la diferencia de picos no es tan grande como la presentada previamente.

A partir de los datos obtenidos en CHIRPS para el cantón Mera, se ha realizado el análisis de consistencias, en función a los periodos comprendidos entre los años P1= 1986-1990/2011-2021 y P2=1991-2010 para poder comprobar si existe homogeneidad o se deben realizar correcciones en los mismos (Tabla 9).

Tabla 9

Análisis De Consistencias Estación Mera (CHIRPS)

ESTACIÓN MERA (CHIRPS)			
IDENTIFICAR Y ANALIZAR PERIODO A CORREGIR			
PERIODO	1	PERIODO	2
Tamaño de la muestra (n1)	192	Tamaño de la muestra (n2)	240
Media de la muestra (x1)	363,941	Media de la muestra (x2)	343,343
Desviación estándar (S1)	122,044	Desviación estándar (S2)	104,396
Grados de libertad (GL1)	191	Grados de libertad (GL2)	239
PRUEBA "T" DE STUDENT			
RESULTADOS			
Desviación estándar ponderada	Sp=		112,577
Desviación de las diferencias de los pro.	Sd=		10,900
Cálculo del T, calculado (Tc)	Tc=		1,890
Grado de Libertad	GL=GL1+GL2		430
Prob. del 95%, nivel de signifi. del 5%	α =		5%
Cálculo del valor crítico de t, tabular Tt	Tt=		1,965
$ Tc = 1,89$	<	$Tt=1,97$	Homogéneo
PRUEBA "F" DE FISHER			
RESULTADOS			
Cálculo del F, calculado (Fc)	1,367		
Cálculo del F tabular (valor crítico de Ft)	1,252		
$Fc= 1,37$	>	$Ft=1,25$	Inconsistente

REALIZAR AJUSTE EN UN PERIODO BAJO CRITERIO

Nota. Se presenta el análisis estadístico para determinar consistencia y homogeneidad en el cantón Mera (CHIRPS)

Por otro lado, como se puede observar, en el caso del análisis en función a la base de datos de CHIRPS para el cantón Mera, se ha observado que presenta homogeneidad en la media (Tabla 9), sin embargo, la prueba F de Fisher arrojó inconsistencia, por lo que se realizó un ajuste de datos para obtener la consistencia de la desviación estándar (Tabla 10).

Tabla 10*Análisis De Consistencias Estación Mera Corregido (CHIRPS)*

ESTACIÓN MERA(CHIRPS)			
IDENTIFICAR Y ANALIZAR PERIODO A CORREGIR			
PERIODO	1	PERIODO	2
Tamaño de la muestra (n1)	192	Tamaño de la muestra (n2)	240
Media de la muestra (x1)	364,979	Media de la muestra (x2)	363,941
Desviación estándar (S1)	122,666	Desviación estándar (S2)	122,044
Grados de libertad (GL1)	191	Grados de libertad (GL2)	239
PRUEBA "T" DE STUDENT			
RESULTADOS			
Desviación estándar ponderada	Sp=		122,321
Desviación de las diferencias de los pro.	Sd=		11,844
Cálculo del T, calculado (Tc)	Tc=		0,088
Grado de Libertad	GL=GL1+GL2		430
Prob. del 95%, nivel de signifi. del 5%	α =		5%
Cálculo del valor crítico de t, tabular Tt	Tt=		1,965
$Tc = 0,09$ < Tt=1,97 Homogéneo			
PRUEBA "F" DE FISHER			
RESULTADOS			
Cálculo del F, calculado (Fc)			1,010
Cálculo del F tabular (valor crítico de Ft)			1,252
Fc= 1,01 < Ft=1,25 Consistente			

NO SE NECESITA REALIZAR UN AJUSTE. (LOS DATOS SON HOMOGÉNEOS Y CONSISTENTES)

Nota. Se presenta el análisis estadístico para determinar consistencia y homogeneidad en el cantón Mera con datos corregidos (CHIRPS)

Estación Guamote

En el caso del cantón Guamote, se presenta la serie de tiempo obtenida a partir de la base de datos del INAMHI (Figura 9), y además en la Figura (10) se puede observar la serie de tiempo final a partir a las correcciones de datos.

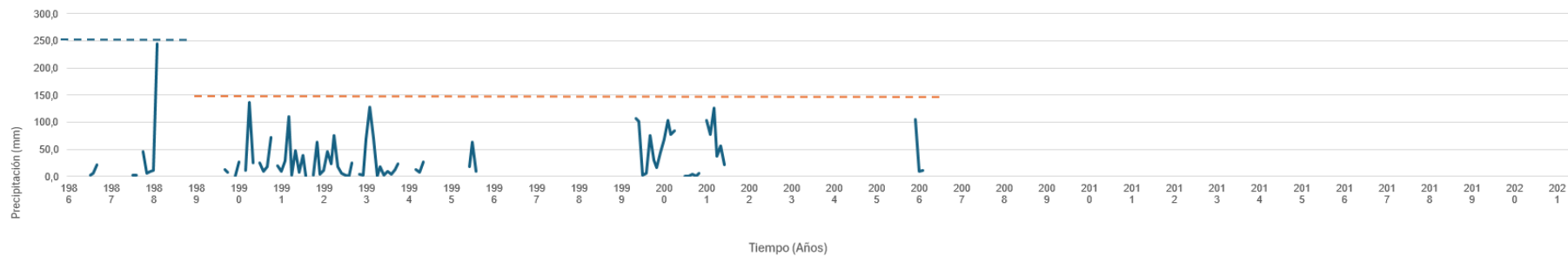


Figura 9. Serie de tiempo. Guamote (INAMHI)

Elaborado por: Autoría Propia

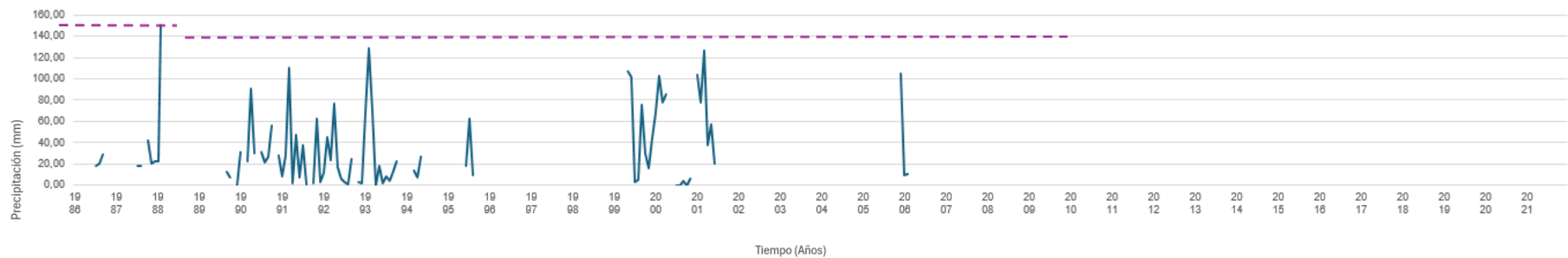


Figura 10. Serie de tiempo. Guamote Corregido (INAMHI)

Elaborado por: Autoría Propia

Se observa que en la Figura (9), la serie de tiempo presentada para los datos del cantón Guamote obtenidos por la base de datos del INAMHI, se ha dividido el análisis en dos periodos de tiempo, donde se nota una significativa diferencia entre los picos; y luego de un análisis de consistencias se logró modificar datos para lograr una mejor consistencia donde se observa (Figura 10) que la diferencia de picos no es tan notoria como la presentada previamente.

A partir de los datos obtenidos en el INAMHI para el cantón Guamote, se ha realizado el análisis de consistencias, en función a los periodos establecidos en la serie de tiempo (Figura 9), para poder comprobar si existe homogeneidad o se deben realizar correcciones en los mismos (Tabla 11).

Tabla 11

Análisis De Consistencias Estación Guamote (INAMHI)

ESTACIÓN GUAMOTE (INAMHI)			
IDENTIFICAR Y ANALIZAR PERIODO A CORREGIR			
PERIODO	1	PERIODO	2
Tamaño de la muestra (n1)	12	Tamaño de la muestra (n2)	79
Media de la muestra (x1)	32,067	Media de la muestra (x2)	34,215
Desviación estándar (S1)	67,909	Desviación estándar (S2)	37,148
Grados de libertad (GL1)	11	Grados de libertad (GL2)	78
PRUEBA "T" DE STUDENT			
RESULTADOS			
Desviación estándar ponderada	Sp=		42,183
Desviación de las diferencias de los pro.	Sd=		13,069
Cálculo del T, calculado (Tc)	Tc=		0,164
Grado de Libertad	GL=GL1+GL2		89
Prob. del 95%, nivel de signifi. del 5%	α =		5%
Cálculo del valor crítico de t, tabular Tt	Tt=		1,987
Tc = 0,16 < Tt=1,99 Homogéneo			
PRUEBA "F" DE FISHER			
RESULTADOS			
Cálculo del F, calculado (Fc)			3,342
Cálculo del F tabular (valor crítico de Ft)			1,914
Fc= 3,34 > Ft=1,91 Inconsistente			

REALIZAR AJUSTE EN UN PERIODO BAJO CRITERIO

Nota. Se presenta el análisis estadístico para determinar consistencia y homogeneidad en el cantón Guamote (INAMHI)

En el caso de los datos obtenidos mediante el INAMHI para el cantón Guamote, se observa que presenta homogeneidad en la media (Tabla 11), sin embargo, la prueba F de Fisher arrojó inconsistencia, por lo que se realizó un ajuste de datos empleados para obtener la consistencia de la desviación estándar (Tabla 12) en los periodos P1= 1986-1988 y P2=1989-2021.

Tabla 12*Análisis De Consistencias Estación Mera Corregido (INAMHI)*

ESTACIÓN MERA (INAMHI)			
IDENTIFICAR Y ANALIZAR PERIODO A CORREGIR			
PERIODO	1	PERIODO	2
Tamaño de la muestra (n1)	192	Tamaño de la muestra (n2)	240
Media de la muestra (x1)	364,979	Media de la muestra (x2)	363,941
Desviación estándar (S1)	122,666	Desviación estándar (S2)	122,044
Grados de libertad (GL1)	191	Grados de libertad (GL2)	239
PRUEBA "T" DE STUDENT			
RESULTADOS			
Desviación estándar ponderada	Sp=		122,321
Desviación de las diferencias de los pro.	Sd=		11,844
Cálculo del T, calculado (Tc)	Tc=		0,088
Grado de libertad	GL=GL1+GL2		430
Prob. del 95%, nivel de signifi. del 5%	α =		5%
Cálculo del valor crítico de t, tabular Tt	Tt=		1,965
Tc = 0,09 < Tt=1,97 Homogéneo			
PRUEBA "F" DE FISHER			
RESULTADOS			
Cálculo del F, calculado (Fc)	1,010		
Cálculo del F tabular (valor crítico de Ft)	1,252		
Fc= 1,01 < Ft=1,25 Consistente			

NO SE NECESITA REALIZAR UN AJUSTE. (LOS DATOS SON HOMOGÉNEOS Y CONSISTENTES)

Nota. Se presenta el análisis estadístico para determinar consistencia y homogeneidad en el cantón Guamote con datos corregidos (INAMHI)

Mientras que, en el caso de los datos obtenidos por la base de datos CHIRPS para el cantón Guamote, se presenta de la misma manera la serie de tiempo inicial (Figura 11) con los valores propuestos en dos periodos de tiempos y, además (Figura 12) se puede observar la serie de tiempo final luego de ser aplicadas a las correcciones.

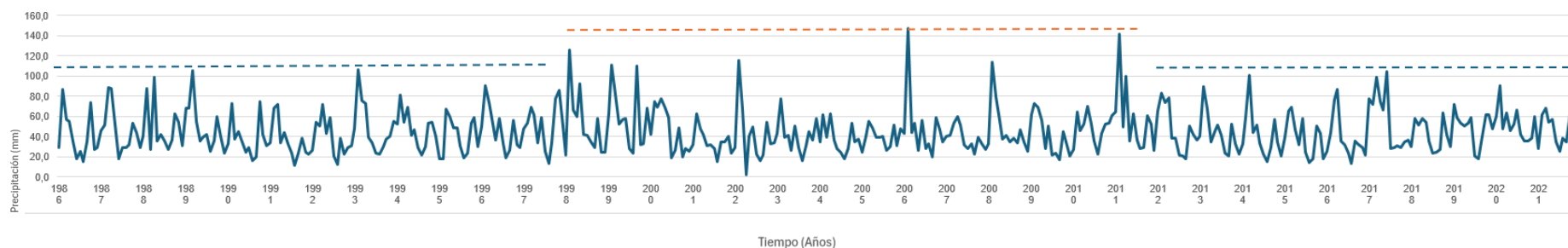


Figura 11. Serie de tiempo. Guamote (CHIRPS)

Elaborado por: Autoría Propia

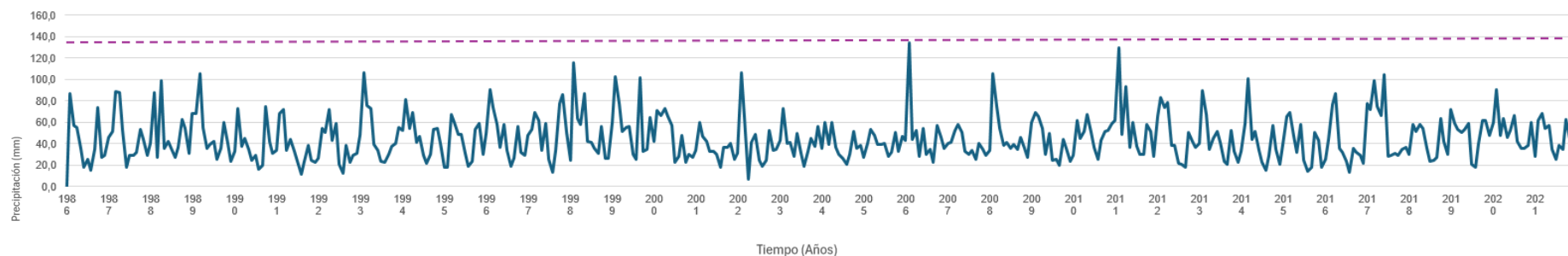


Figura 12. Serie de tiempo. Guamote Corregido (CHIRPS)

Elaborado por: Autoría Propia

Como se puede observar (Figura 11), la serie de tiempo presentado para los datos del cantón Guamote obtenidos por la base de datos del CHIRPS, se ha dividido el análisis en dos periodos de tiempo P1= 1986-1997/2012-2021 y P2=1998-2011, donde se nota una significativa diferencia entre los picos, y luego de un análisis de consistencias se logró modificar datos para lograr una mejor calidad de estos. En la Figura (12) podemos ver que la diferencia de picos no es tan significativa como la presentada previamente. Se realiza el análisis de consistencias para esta estación (Tabla 13).

Tabla 13*Análisis De Consistencias Estación Guamote (CHIRPS)*

ESTACIÓN GUAMOTE (CHIRPS)			
IDENTIFICAR Y ANALIZAR PERIODO A CORREGIR			
PERIODO	1	PERIODO	2
Tamaño de la muestra (n1)	264	Tamaño de la muestra (n2)	168
Media de la muestra (x1)	45,091	Media de la muestra (x2)	45,340
Desviación estándar (S1)	20,568	Desviación estándar (S2)	23,422
Grados de libertad (GL1)	263	Grados de libertad (GL2)	167
PRUEBA "T" DE STUDENT			
RESULTADOS			
Desviación estándar ponderada	Sp=		21,721
Desviación de las diferencias de los pro.	Sd=		2,144
Cálculo del T, calculado (Tc)	Tc=		0,116
Grado de Libertad	GL=GL1+GL2		430
Prob. del 95%, nivel de signifi. del 5%	α =		5%
Cálculo del valor crítico de t, tabular Tt	Tt=		1,965
Tc = 0,12 < Tt=1,97 Homogéneo			
PRUEBA "F" DE FISHER			
RESULTADOS			
Cálculo del F, calculado (Fc)	1,297		
Cálculo del F tabular (valor crítico de Ft)	1,255		
Fc= 1,30 > Ft=1,26 Inconsistente			

REALIZAR AJUSTE EN UN PERIODO BAJO CRITERIO

Nota. Se presenta el análisis estadístico para determinar consistencia y homogeneidad en el cantón Guamote (CHIRPS)

En el caso de los datos obtenidos mediante el CHIRPS para el cantón Guamote, se observa que presenta homogeneidad en la media (Tabla 13), sin embargo, la prueba F de Fisher arrojó inconsistencia, por lo que se realizó un ajuste de datos empleados para obtener la consistencia de la desviación estándar (Tabla 14).

Tabla 14*Análisis De Consistencias Estación Guamote Corregido (CHIRPS)*

ESTACIÓN GUAMOTE (CHIRPS)			
IDENTIFICAR Y ANALIZAR PERIODO A CORREGIR			
PERIODO	1	PERIODO	2
Tamaño de la muestra (n1)	263	Tamaño de la muestra (n2)	168
Media de la muestra (x1)	45,151	Media de la muestra (x2)	45,091
Desviación estándar (S1)	20,584	Desviación estándar (S2)	20,568
Grados de libertad (GL1)	262	Grados de libertad (GL2)	167
PRUEBA "T" DE STUDENT			
RESULTADOS			
Desviación estándar ponderada	Sp=		20,578
Desviación de las diferencias de los pro.	Sd=		2,032
Cálculo del T, calculado (Tc)	Tc=		0,030
Grado de Libertad	GL=GL1+GL2		429
Prob. del 95%, nivel de signifi. del 5%	α =		5%
Cálculo del valor crítico de t, tabular Tt	Tt=		1,965
 Tc = 0,03	<	Tt=1,97	Homogéneo
PRUEBA "F" DE FISHER			
RESULTADOS			
Cálculo del F, calculado (Fc)	1,002		
Cálculo del F tabular (valor crítico de Ft)	1,255		
Fc= 1,00	<	Ft=1,26	Consistente

NO SE NECESITA REALIZAR UN AJUSTE. (LOS DATOS SON HOMOGÉNEOS Y CONSISTENTES)

Nota. Se presenta el análisis estadístico para determinar consistencia y homogeneidad en el cantón Guamote con datos corregidos (CHIRPS)

Análisis de consistencia y homogenización (temperatura)

Los datos de temperatura de igual forma fueron sometidos a las pruebas de consistencia y homogeneidad, en las cuales no se obtuvo problema y no se necesitó realizar ninguna corrección. De igual forma para estos datos se siguió la metodología de Villón, 2006.

Estación Mera

En la Figura (13) se muestra la serie de tiempo para la temperatura máxima de Mera. Por otro lado en la Figura (14) podemos ver la serie de tiempo para la temperatura mínima de Mera.



Figura 13. Serie de tiempo. Mera (T.máx)

Elaborado por: Autoría Propia

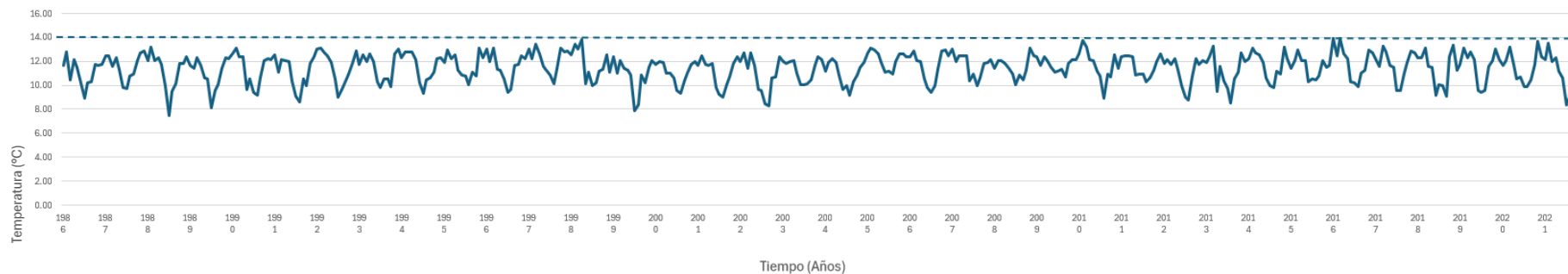


Figura 14. Serie de tiempo. Mera (T.mín)

Elaborado por: Autoría Propia

Estación Guamote

En la Figura (15) se muestra la serie de tiempo para la temperatura máxima de Guamote. Por otro lado en la Figura (16) podemos ver la serie de tiempo para la temperatura mínima de Guamote.

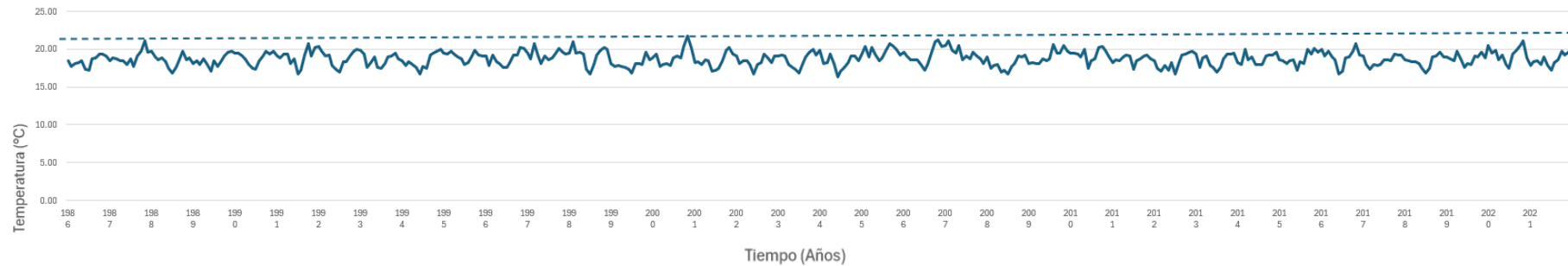


Figura 15. Serie de tiempo. Guamote (T.máx)

Elaborado por: Autoría Propia



Figura 16. Serie de tiempo. Guamote (T.mín)

Elaborado por: Autoría Propia

Tanto para las gráficas de series de tiempo de Mera en las Figuras (13) y (14) y para Guamote en las Figuras (15) y (16), bajo la metodología que se está utilizando para la homogenización de datos el primer paso es el análisis visual gráfico, de tal forma que observando las series de datos no se identifican dos periodos, por ende, no es necesario realizar la prueba “T” de Student y “F” de Fisher, sin embargo utilizando cualquier división de periodos se puede comprobar que en efecto los datos son homogéneos y consistentes.

Relleno de datos en R Studio

Como se ha podido observar existen datos faltantes en las Figuras (6) y (10) que son proporcionas por el INAMHI, esto se debe a que al ser tomadas por estaciones terrestres las mismas dejan de funcionar o son puestas en mantenimiento lo que hace que se genere esta situación. Utilizando R Studio se analizará y completará estos datos.

Resumen de datos faltantes

Se presenta un resumen de los datos faltantes (Gráfica 1) y estadísticas de estos (Figura 17), con el objetivo de evidenciar el déficit de datos que estamos teniendo.

```
Missings per variable:
Variable Count
Mera (INAMHI)    17
Mera (CHRIPS)    0
Guamote (INAMHI) 341
Guamote (CHRIPS) 0
```

Gráfica 1. Resumen de datos faltantes. R Studio.

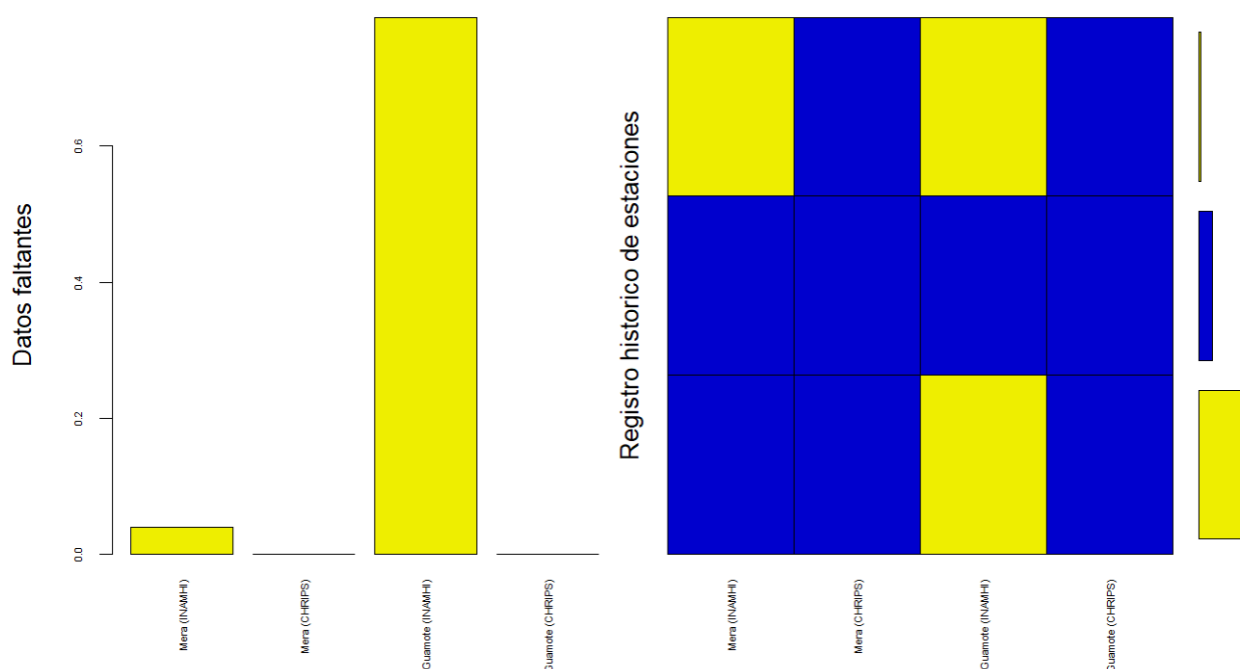


Figura 17. Estadística de datos faltantes. R Studio.

Elaborado por: Autoría Propia

Nota: Se comprueba (Figura 17) que solo faltan datos en las fuentes de estaciones terrestres, de tal forma se sabe que en Mera faltan 17 y en Guamote 341 datos. Teniendo en cuenta que los datos totales son de 432, para cada estación.

Paquete missForests

Se procede a la imputación de datos con missForests, con un número de iteraciones de 18, se utiliza las siguientes líneas de código (Figura 18). Véase también el Anexo (44)

```
imp <- missForest(date.matrix,maxiter= 18, verbose = TRUE,  
                  variablewise = TRUE,mtry = floor(sqrt(ncol(date.matrix))),  
                  replace = TRUE, parallelize = c('no', 'variables', 'forests'))  
imp$OOBerror
```

Figura 18. Código para relleno de datos. R Studio.

En un total de tan solo 4 iteraciones missForests completa los datos. También nos arroja el valor cuadrático medio normalizado (NRMSE) y este es de 0.316, validando así la precisión de este proceso.

Análisis entre estaciones terrestres y satelitales

El análisis de la data base INAMHI nos permite comprobar si existe algún tipo de correlación que nos pueda asegurar la veracidad de los datos del satélite CHIRPS y así tener una mejor confiabilidad en el estudio. Para este caso solo es coherente relacionar los datos de las estaciones del mismo lugar de estudio, es decir la estación terrestre de Mera código “M0008” del visor hidrometereológico del IMAHI (Anexo 1) y los datos de la página ClimateSERV del mismo cantón (Anexo 2); de la misma forma del cantón Guamate la estación terrestre de código “M0134” y del satélite.

Serie de tiempo

Una vez ya completos los datos se muestra las series de tiempo a manera de comparación y de observar cómo missForests completo los valores faltantes.

Se plotean estas gráficas, se analizan y se contrastan unas con otras (Figura 19) y luego se gráfica las series de tiempo con los datos ya completos (Figura 20).

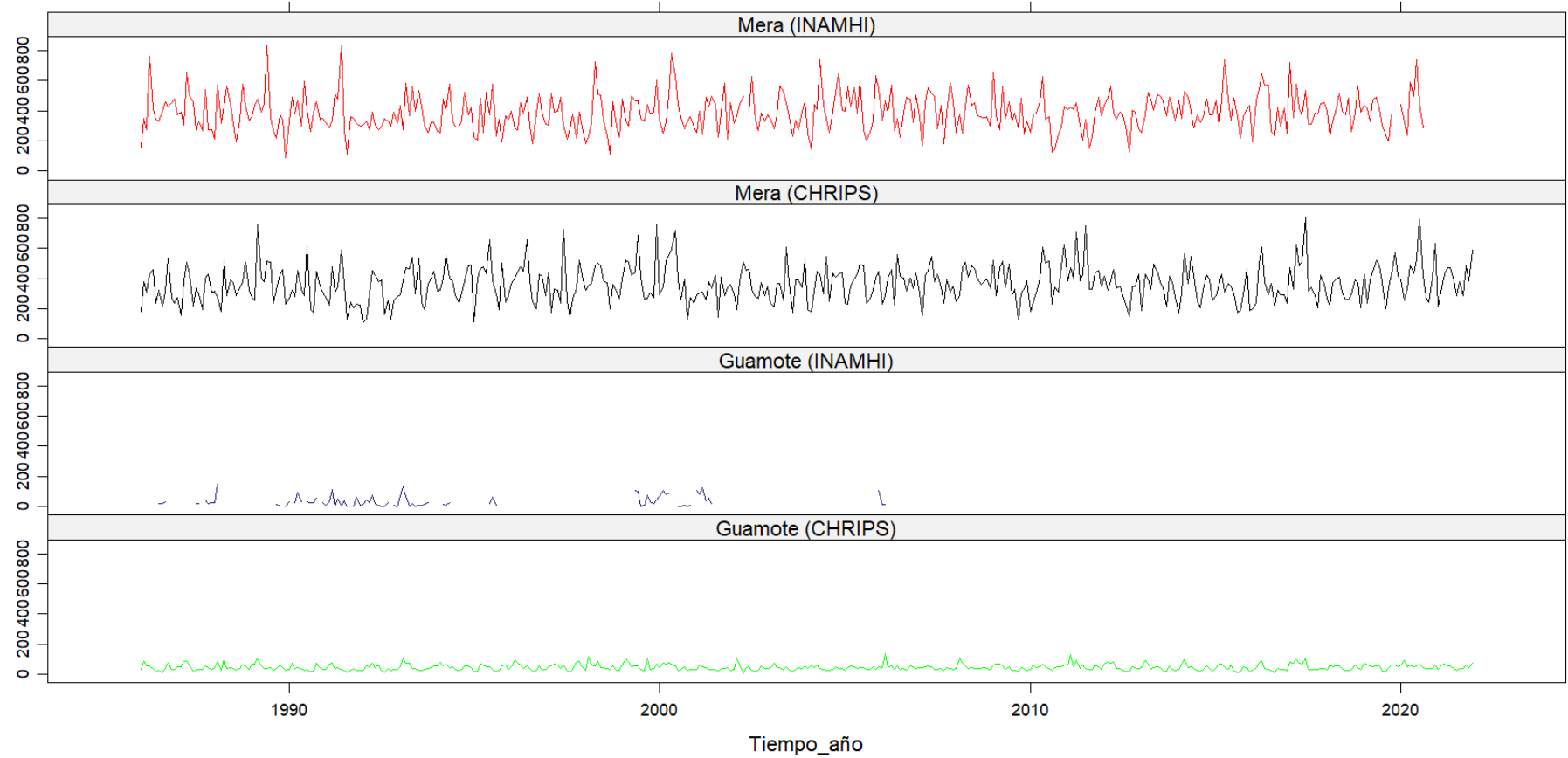


Figura 19. Series de tiempo (Datos existentes). R Studio.

Elaborado por: Autoría Propia

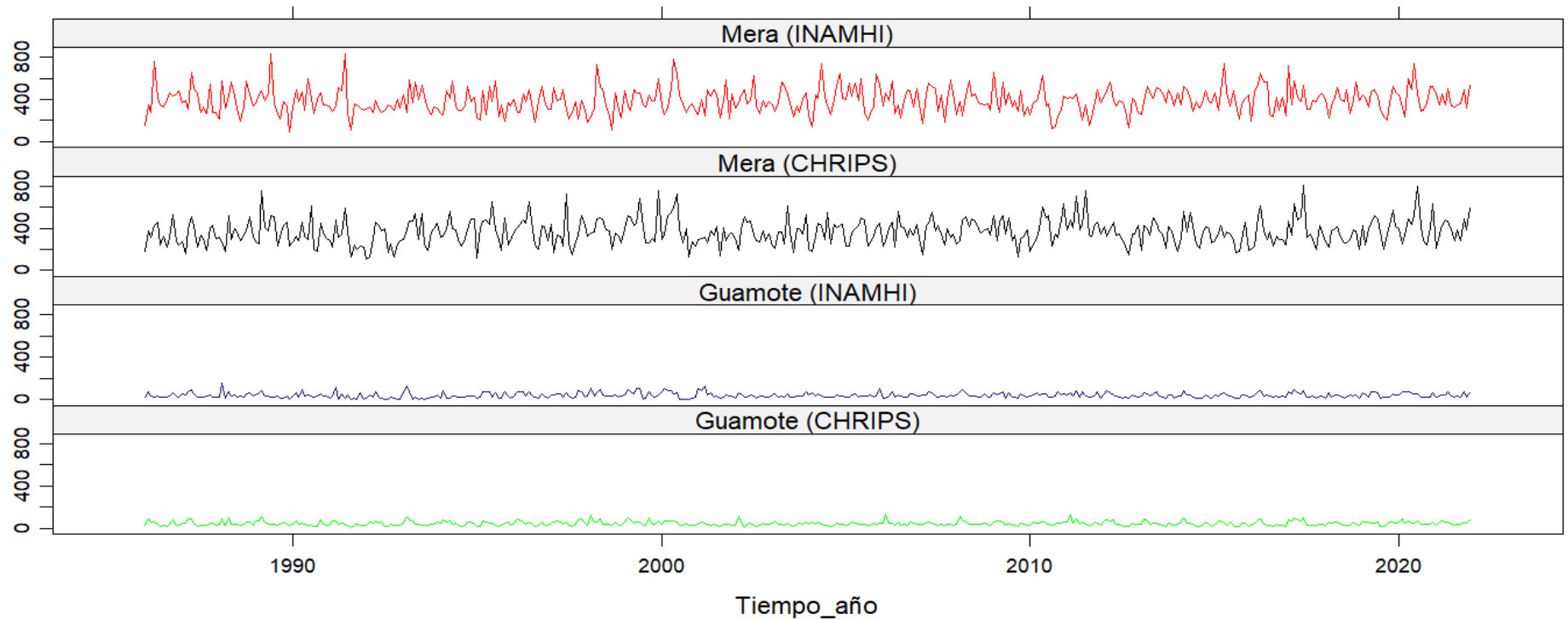


Figura 20. Series de tiempo (Datos completos). R Studio.

Elaborado por: Autoría Propia

Nota: Como se ve (Figura 20) los datos se han llenado siguiendo una secuencia lógica, se procede a realizar una vez más un análisis de consistencia y homogenización y se comprueba que los datos ya completos no necesitan de ningún ajuste.

Figuras por meses y años

Se muestran gráficas obtenidas en R Studio (Figuras 21-24) con el paquete hydroplot (Anexo 7), que nos ayudan a comprender de mejor manera el comportamiento de las precipitaciones.

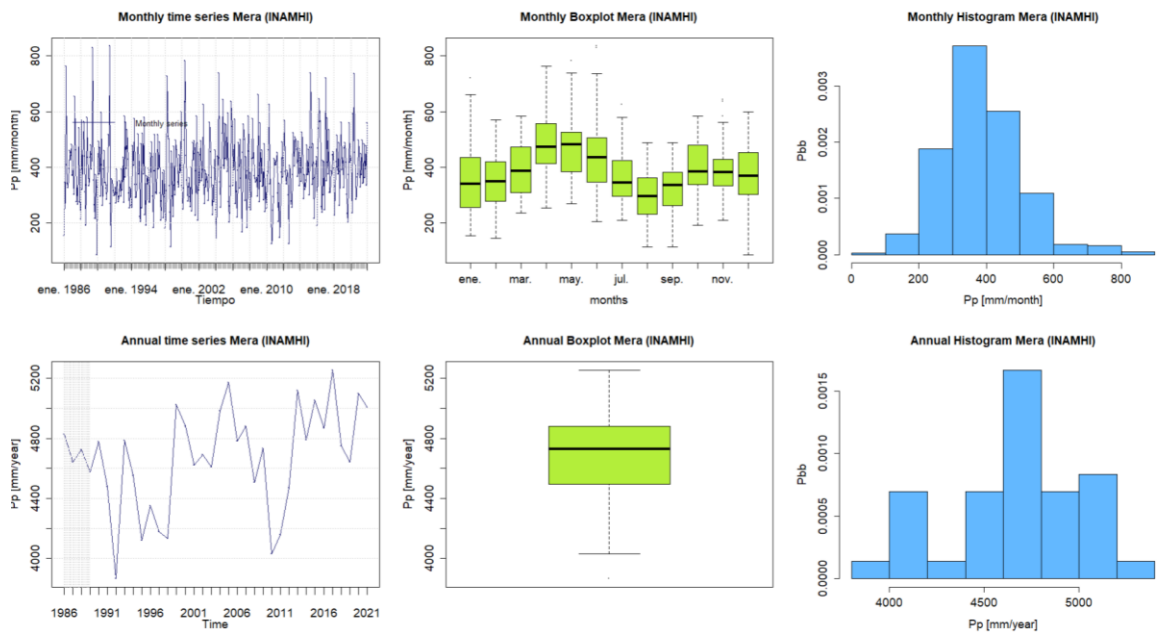


Figura 21. Figuras precipitación. Mera (INMAHI). R Studio.

Elaborado por: Autoría Propia

En la Figura (21) luego de analizar el histograma por meses se ve que en valor ideal es de 400 y la barra más grande se encuentra en dicho lugar por ende es un proceso centrado y también la forma de campana se cumple mostrando así su distribución normal, es decir la calidad es buena en ese sentido; sin embargo, la variación si es alta, esto se puede deber a los picos altos y bajos de precipitaciones. La gráfica de caja y bigotes nos muestra que entre los datos de enero a diciembre existe una similitud pues las medianas de las cajas coinciden entre sí. En el gráfico de caja y bigotes por años vemos que la mediana esta más arriba diciéndonos que el rango de valores a la derecha es ligeramente más grande.



Figura 22. Figuras precipitación. Mera (CHIRPS). R Studio.

Elaborado por: Autoría Propia

En la Figura (22) podemos notar que también es un proceso centrado pues el valor ideal se encuentra junto a la mayor barra y de igual forma se demuestra una distribución normal al formarse la campana, también denota una variabilidad alta. En el caso del gráfico de caja y bigotes se ve lo mismo, existen similitudes pues las medianas de las cajas coinciden entre sí. El único cambio significativo es en la figura de caja y bigotes de un año pues esta muestra una mediana más centrada.

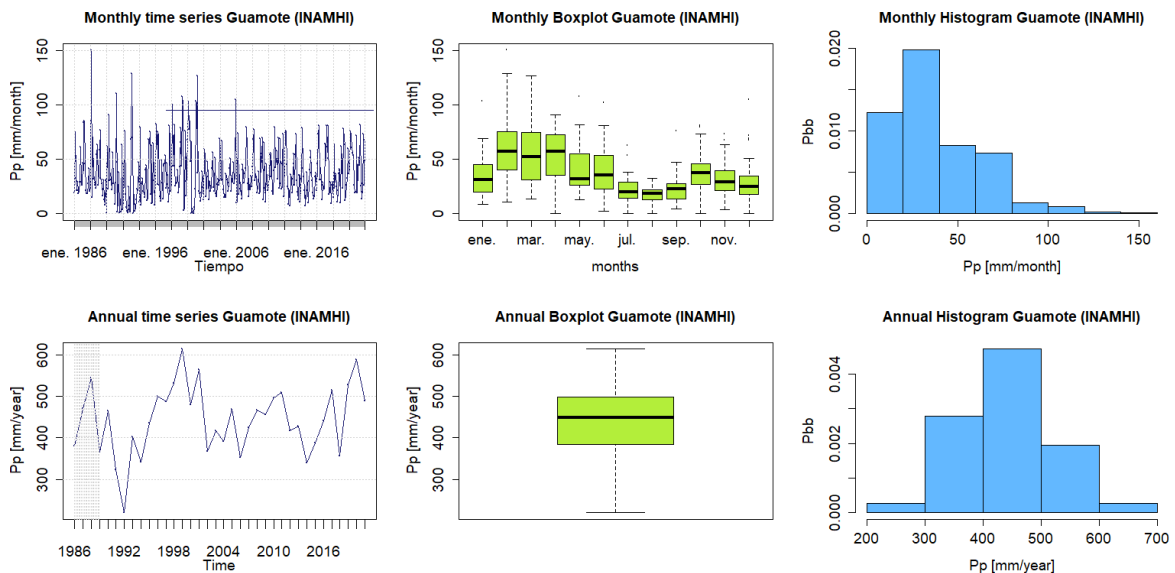


Figura 23. Figuras precipitación. Guamote (INAMHI). R Studio.

Elaborado por: Autoría Propia

Para el caso de la Figura (23) no se nota un proceso centrado ni normalizado en la serie de datos de meses sino más bien podemos ver esto en la gráfica de años, que si cumple con estos parámetros; sin embargo, la variación aquí es aún más notoria. Para la gráfica de

caja y bigotes por meses igual se puede notar similitud en los datos y que existen cajas con datos muy pequeños en comparación a otros. Lo destacable de aquí es la figura de caja y bigotes por año, que muestra una mediana bastante centrada.

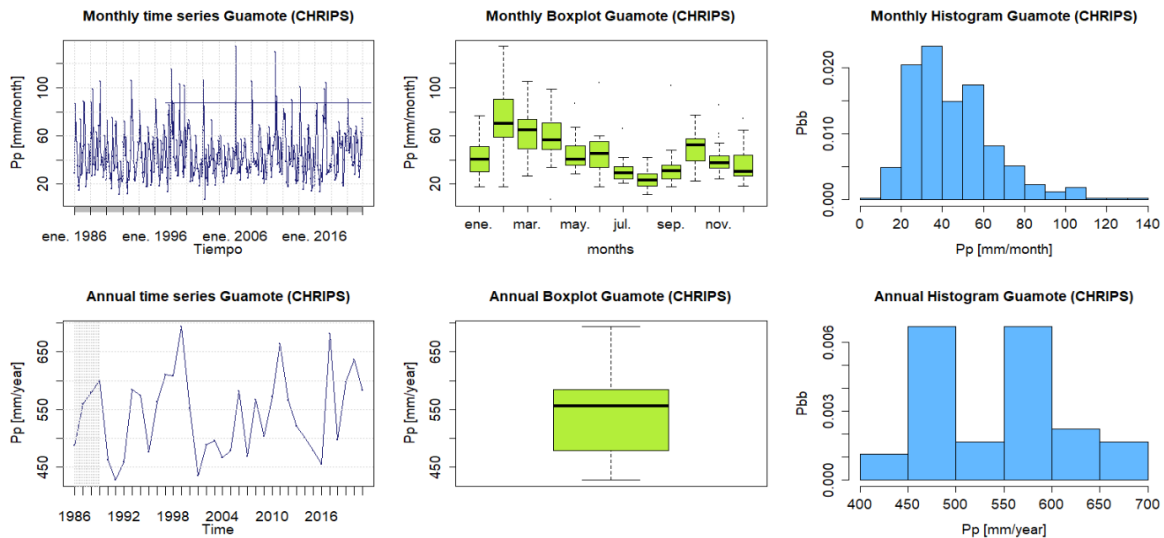


Figura 24. Figuras precipitación. Guamote (CHIRPS). R Studio.

Elaborado por: Autoría Propia

En la Figura (24) en la serie de datos lo destacable es que la variación es más pequeña a la que ya hemos visto antes en otras gráficas; sin embargo, es un proceso que se encuentra no muy centrado y el problema más grande es que carece de forma de campana y que los datos poseen un sesgo hacia la derecha. Para la gráfica de caja y bigotes por meses se puede notar similitud en los datos y que existen cajas con datos muy pequeños en comparación a otros. Y la gráfica por años la mediana no se encuentra centrada sino más bien el rango de valores se decanta hacia la derecha.

Nota: Luego de realizar el análisis de las gráficas para cada estación en el caso de Mera se ve un comportamiento ligeramente mejor en los datos del satélite CHIRPS; mientras que para Guamote es difícil elegir que estación se comporta mejor.

Análisis de doble masa

El análisis de masas sirve para determinar la estación con menos quiebres y elegirla de base. Se grafica las precipitaciones acumuladas de la estación terrestre y satelital en el eje de las ordenadas y los acumulados promedios en el eje de las abscisas. Para Mera se grafica tanto los datos obtenidos del INAMHI como los obtenidos de CHIRPS en la Figura (25) y en la Figura (26) para Guamote.

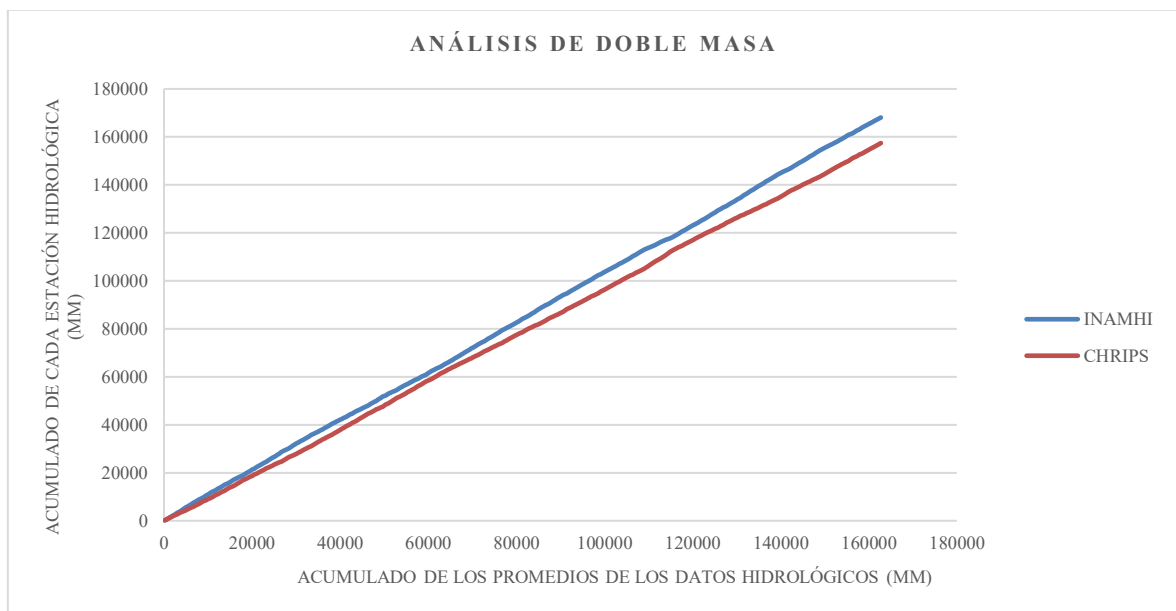


Figura 25. Análisis de doble masa entre las estaciones de Mera.

Elaborado por: Autoría Propia

Los datos del INAMHI se encuentran por arriba de los del CHIRPS, lo que nos dice que en la final acumulada se demuestran más cantidad precipitaciones en la estación terrestre.

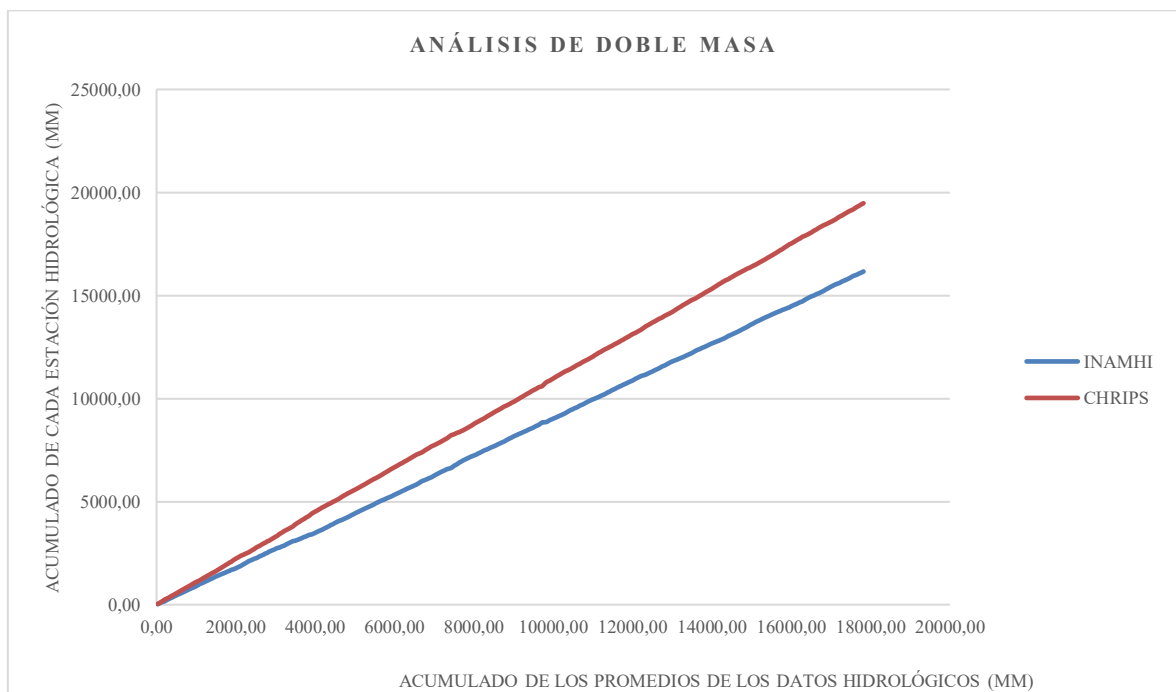


Figura 26. Análisis de doble masa entre las estaciones de Guamote.

Elaborado por: Autoría Propia

Por el contrario del cantón Mera, en este cantón podemos notar que los datos del CHIRPS demuestran una mayor cantidad de precipitaciones.

Nota: Con este análisis nos damos cuenta de que como nuestros datos ya están homogenizados, prácticamente los quiebres ya no existen y las dos estaciones serían válidas para utilizarlas en el estudio.

Correlación entre estaciones

Para comprobar la relación entre las estaciones terrestres y satelitales, con la ayuda de Excel se calculará la correlación de Pearson, para Mera (Tabla 15) y para Guamote (Tabla 16).

Tabla 15

Correlación de Pearson de Mera entre la estación terrestre (INAMHI) y satelital (CHIRPS).

Correlación	
Pearson	0.44

Tabla 16

Correlación de Pearson de Guamote entre la estación terrestre (INAMHI) y satelital (CHIRPS).

Correlación	
Pearson	0.73

Claramente entre las estaciones de Guamote (Tabla 16) se ve una mejor correlación, aunque esto puede ser debido a que la mayoría de los datos fueron rellenados en esta estación terrestre.

Sin embargo, con los resultados de las dos nos damos cuenta que se encuentran en una correlación directa.

Nota: Tanto en los datos terrestres y satelitales se ve concordancia y correlación por ello se procede a seguir trabajando con los datos históricos proporcionados por el satélite CHIRPS, la razón de elegir este tipo de toma de datos es por la facilidad de su obtención y porque no hubo ningún valor faltante, pues en el caso de los terrestres las estaciones entran en manteniendo o se dañan, provocando un sesgo significativo de datos.

Índices de precipitación

Se calcula estos índices de precipitación para saber el nivel de sequía que se tiene en estos dos cantones, se lo hizo en R Studio, utilizando el paquete “SPEI” (Anexo 8).

Standardized Precipitation Index (SPI)

Para este índice solamente se necesita la precipitación, se lo calcula para ventanas de uno y doce meses (Figura 27).

```
#Cálculo el SPI a partir de la precipitación (Standardized Precipitation Index)
#
#Un mes
spi1 <- spi(df$Pp,1)
spi1
plot(spi1)

#Doce meses
spi12 <- spi(df$Pp,12)
spi12
plot(spi12)
```

Figura 27. Código para cálculo del SPI. R Studio.

Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI)

La precipitación, la temperatura máxima y la temperatura mínima, son utilizados para este cálculo. Primero se calcula la evapotranspiración potencial y el balance (Figura 28).

```
#Cálculo de la Evapotranspiración (ETP)

sapply(df,class)
attach(df)

#Hargreaves method

df$ETP_har <- hargreaves(Tmin, Tmax, lat= -1.4651)

#Balance
attach(df)
df$BAL <- Pp-ETP_har
```

Figura 28. Código para cálculo de la EVP y el Balance. R Studio.

Luego con esto resultados se calcula el SPEI (Figura 29).

```
#Cálculo del SPEI

#Un mes
df.matrix <- as.matrix(df)
spei1 <- spei(df.matrix[, 'BAL'],1)
spei1
plot(spei1)

#Doce meses
spei12 <- spei(df.matrix[, 'BAL'],12)
spei12
plot(spei12)
```

Figura 29. Código para cálculo del SPEI. R Studio

Análisis de resultados de índices de precipitación

Se muestran las gráficas obtenidas en Excel tanto del SPI (Figura 30) para Mera y (Figura 32) para Guamote; como del SPEI (Figura 31) para Mera y (Figura 33) para Guamote.

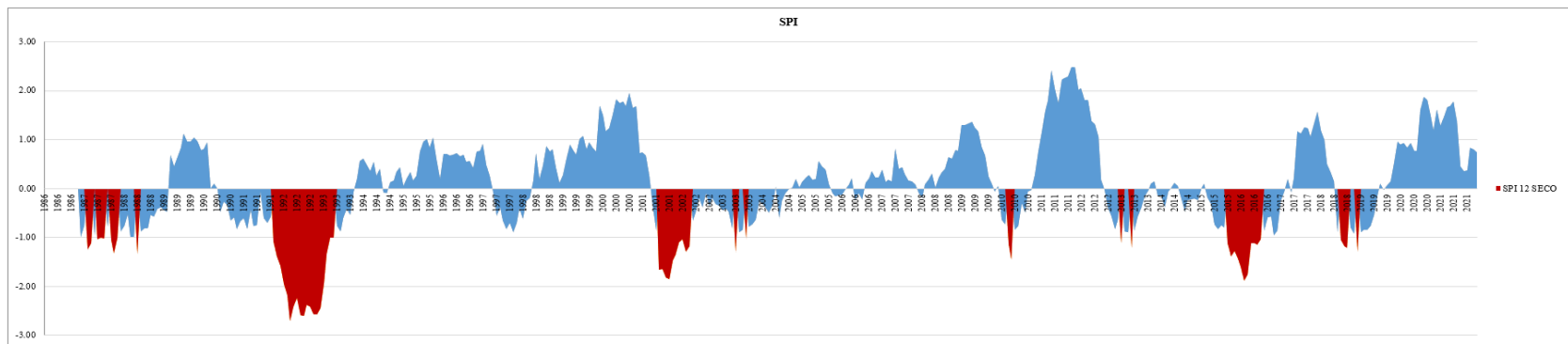


Figura 30. SPI. Mera.

Elaborado por: Autoría Propia

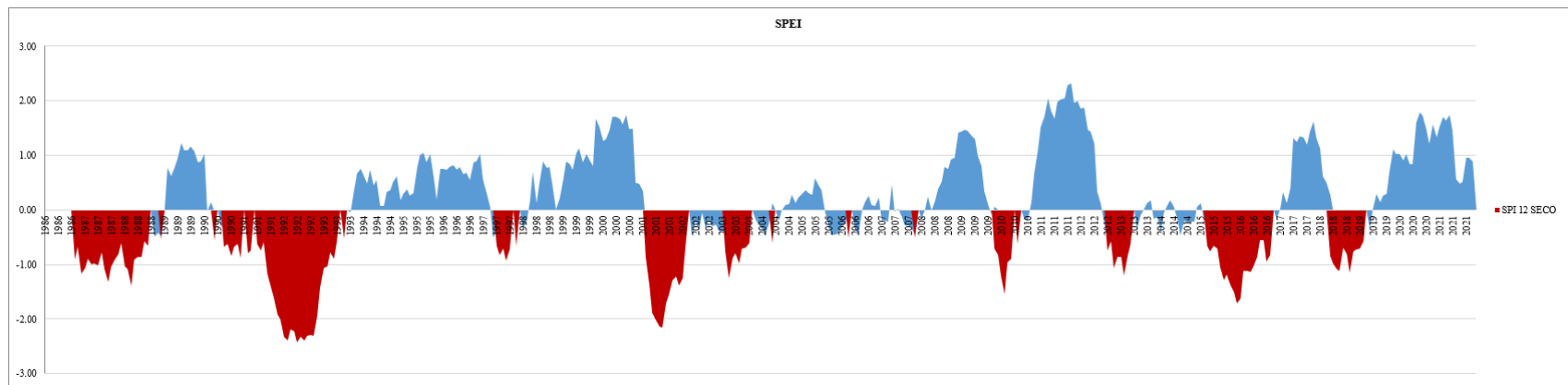


Figura 31. SPEI. Mera.

Elaborado por: Autoría Propia

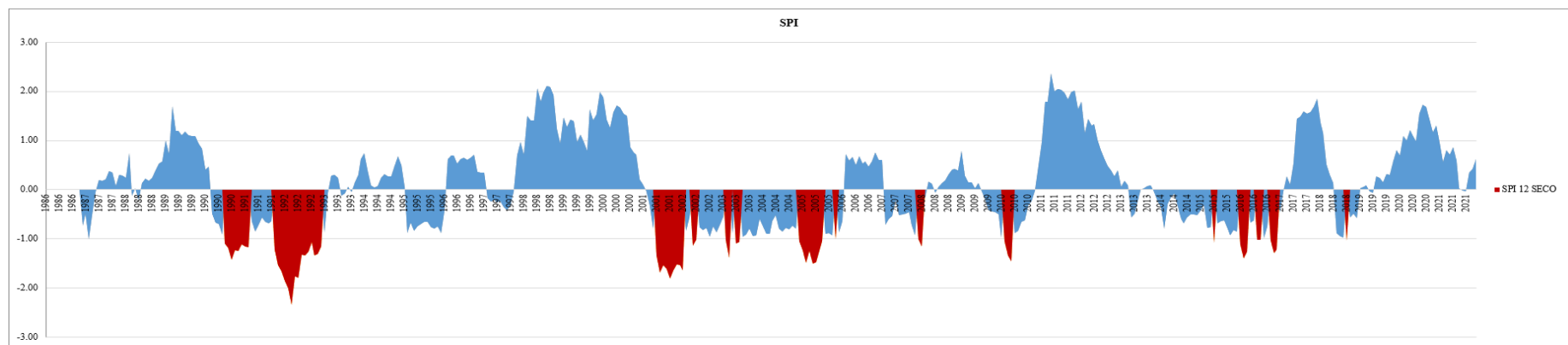


Figura 32. SPI. Guamate.

Elaborado por: Autoría Propia

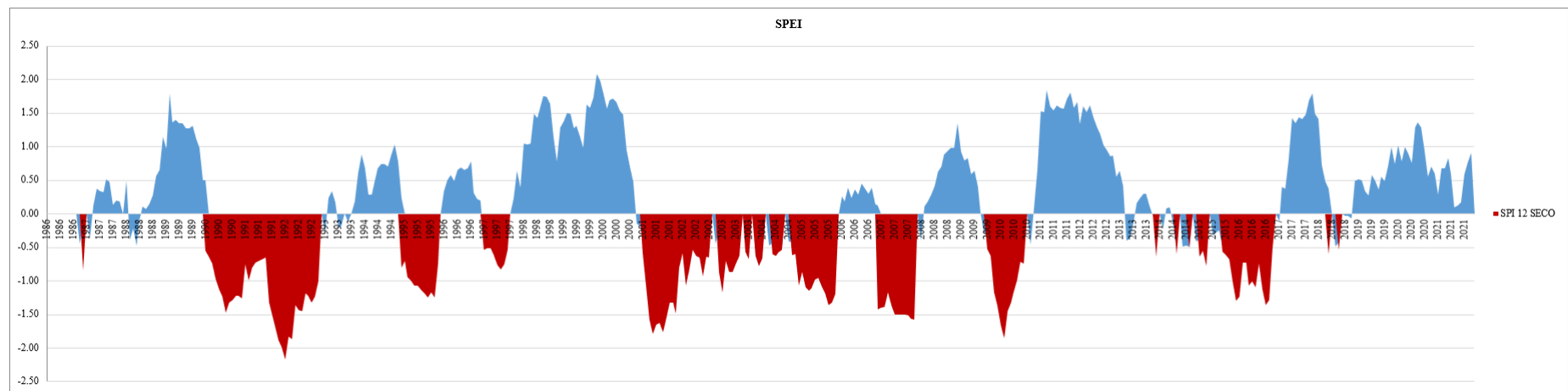


Figura 33. SPEI. Guamate.

Elaborado por: Autoría Propia

Viendo la serie de datos de las Figuras (30) y (31) del cantón Mera se ve que los picos más bajos de sequías se encuentran en 1992-1993, incluso llegan a tener un valor de -2, lo que quiere decir que se encuentran en una sequía extrema y bastante peligrosa, así mismo para las precipitaciones existen picos bastantes altos en los años 2000-2001 y 2011-2012.

En las Figuras (32) y (33) para el cantón Guamote del año 1991-1992, de igual forma existen valores de sequías peligrosos y en año 2001 y 2010 por otro lado vemos precipitaciones altas en 1998-2000 y 2011-2012.

Nota: Analizando estos resultados se observan eventos de sequía y humedad en períodos de años parecidos donde existen coincidencias, hay que recalcar que estas estaciones se encuentran en provincias diferentes y aun así se establece esa relación.

En la Tabla (17) se ve la correlación de Pearson que se realizó entre el SPI y el SPEI.

Tabla 17

Correlación de Pearson entre SPI y SPEI.

Correlación	
Pearson	0.98

Tanto a través de la gráfica como de la correlación se verifica la relación entre estos dos factores, sin embargo, el SPEI resulta más estricto a nivel de sequías por ende nos quedamos con este indicador para el desarrollo del modelo matemático.

Desarrollo del modelo predictivo

Análisis de regresión lineal múltiple

Para este análisis se utilizan los datos finales teniendo como única variable dependiente al SPEI la cual es la que se va a predecir o encontrar mediante el modelo matemático. Mientras que como variables independientes están, los años, meses, precipitación (CHIRPS), temperatura máxima y temperatura mínima.

Este análisis de regresión se realiza en el programa de R Studio (Anexo 9), su línea de código específica se muestra en la Figura (34).

```
#Análisis de regresión lineal
regresion <- lm(SPEI1 ~ Año + Mes + Pp + Tmax + Tmin,data=df )
summary(regresion)
plot(regresion)
write.xlsx(regresion, 'results.xlsx')
```

Figura 34. Código para cálculo de regresión lineal. R Studio

Los resultados de este análisis de regresión lineal los podemos ver de mejor manera en una gráfica Quantil-Quantil (Figura 35).

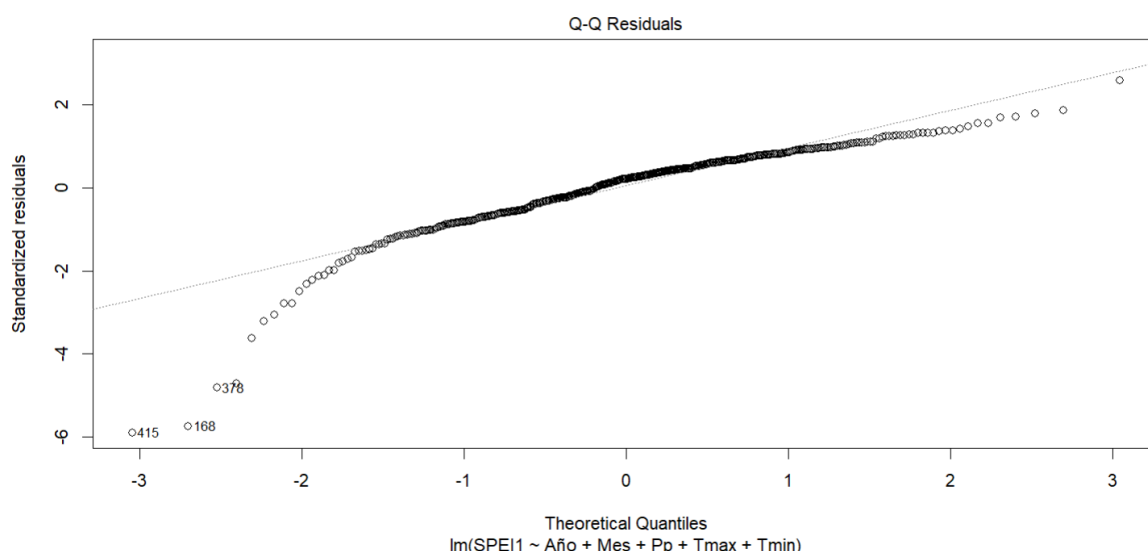


Figura 35. Gráfico Quantil-Quantil (Q-Q). R Studio

Elaborado por: Autoría Propia

Con ayuda del gráfico de cuantiles teóricos y los datos ordenados, podemos llegar a evaluar la normalidad de los residuos y vemos que una ínfima parte de los datos en las colas no cae directamente en la línea de tendencia, sin embargo, los demás residuos resultantes si se encuentran muy cercanos y por ende se puede decir que sigue una distribución normal.

Resultados del modelo predictivo

Finalmente, el programa nos arroja ecuaciones para cada mes. Teniendo en cuenta que se diferencia entre Mera (tabla 18) y Guamote (Tabla 19).

Tabla 18

Ecuaciones de la estación de Mera.

Ecuaciones	
Enero	$SPEI = -3.393 + 0.0003AÑO + 1.517 + 0.009Pp - 0.072Tmáx + 0.026Tmín$
Febrero	$SPEI = -3.393 + 0.0003AÑO + 1.497 + 0.009Pp - 0.072Tmáx + 0.026Tmín$
Marzo	$SPEI = -3.393 + 0.0003AÑO + 0.396 + 0.009Pp - 0.072Tmáx + 0.026Tmín$
Abril	$SPEI = -3.393 + 0.0003AÑO + 0.000 + 0.009Pp - 0.072Tmáx + 0.026Tmín$
Mayo	$SPEI = -3.393 + 0.0003AÑO + 0.0266 + 0.009Pp - 0.072Tmáx + 0.026Tmín$
Junio	$SPEI = -3.393 + 0.0003AÑO - 0.129 + 0.009Pp - 0.072Tmáx + 0.026Tmín$
Julio	$SPEI = -3.393 + 0.0003AÑO + 0.425 + 0.009Pp - 0.072Tmáx + 0.026Tmín$

Agosto	$SPEI = -3.393 + 0.0003AÑO + 1.789 + 0.009Pp - 0.072Tmáx + 0.026Tmín$
Septiembre	$SPEI = -3.393 + 0.0003AÑO + 1.676 + 0.009Pp - 0.072Tmáx + 0.026Tmín$
Octubre	$SPEI = -3.393 + 0.0003AÑO + 0.942 + 0.009Pp - 0.072Tmáx + 0.026Tmín$
Noviembre	$SPEI = -3.393 + 0.0003AÑO + 0.752 + 0.009Pp - 0.072Tmáx + 0.026Tmín$
Diciembre	$SPEI = -3.393 + 0.0003AÑO + 0.820 + 0.009Pp - 0.072Tmáx + 0.026Tmín$

Tabla 19

Ecuaciones de la estación de Guamote.

Ecuaciones	
Enero	$SPEI = 3.570 + 0.0001AÑO + 1.103 + 0.055Pp - 0.434Tmáx + 0.182Tmín$
Febrero	$SPEI = 3.570 + 0.0001AÑO - 0.899 + 0.055Pp - 0.434Tmáx + 0.182Tmín$
Marzo	$SPEI = 3.570 + 0.0001AÑO - 0.243 + 0.055Pp - 0.434Tmáx + 0.182Tmín$
Abril	$SPEI = 3.570 + 0.0001AÑO + 0.000 + 0.055Pp - 0.434Tmáx + 0.182Tmín$
Mayo	$SPEI = 3.570 + 0.0001AÑO + 0.814 + 0.055Pp - 0.434Tmáx + 0.182Tmín$
Junio	$SPEI = 3.570 + 0.0001AÑO + 0.650 + 0.055Pp - 0.434Tmáx + 0.182Tmín$
Julio	$SPEI = 3.570 + 0.0001AÑO + 1.644 + 0.055Pp - 0.434Tmáx + 0.182Tmín$
Agosto	$SPEI = 3.570 + 0.0001AÑO + 2.344 + 0.055Pp - 0.434Tmáx + 0.182Tmín$
Septiembre	$SPEI = 3.570 + 0.0001AÑO + 2.100 + 0.055Pp - 0.434Tmáx + 0.182Tmín$
Octubre	$SPEI = 3.570 + 0.0001AÑO + 1.141 + 0.055Pp - 0.434Tmáx + 0.182Tmín$
Noviembre	$SPEI = 3.570 + 0.0001AÑO + 1.561 + 0.055Pp - 0.434Tmáx + 0.182Tmín$
Diciembre	$SPEI = 3.570 + 0.0001AÑO + 1.582 + 0.055Pp - 0.434Tmáx + 0.182Tmín$

Nota: Las ecuaciones son las mismas solo cambia el valor de cada mes.

Validación de resultados

Para validar los resultados se hará una comparación visual, además de calcular el coeficiente de Pearson (R) y un coeficiente de determinación (R^2), de un conjunto de datos históricos y los otros calculados con las ecuaciones de las Tablas (18) y (19).

Para la comprobación se analizaron cuatro años de forma aleatoria, esto con el objetivo de observar de mejor manera el comportamiento de datos. Los meses que se escogen tienen picos altos y bajos, esto con el fin de comprobar su validez en ambos sentidos. El análisis para el cantón Mera será de 1996 hasta 1999, se observa la serie de tiempo para este periodo en la Figura (36). Mientras que para el cantón Guamote será de 1994 hasta 1997, se observa la serie de tiempo para este periodo en la Figura (37). Se muestra mapas de precipitación (Figuras 38-39) de ambas zonas en estos periodos a fin de comprobar los resultados del SPEI y a su vez sus respectivas series de tiempo.

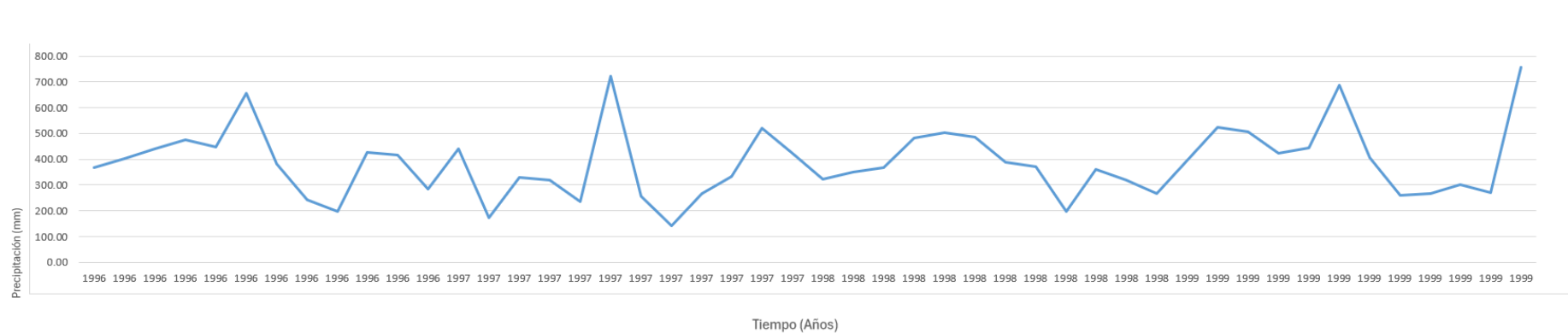


Figura 36. Serie de tiempo. Mera (1996-1999).

Elaborado por: Autoría Propia

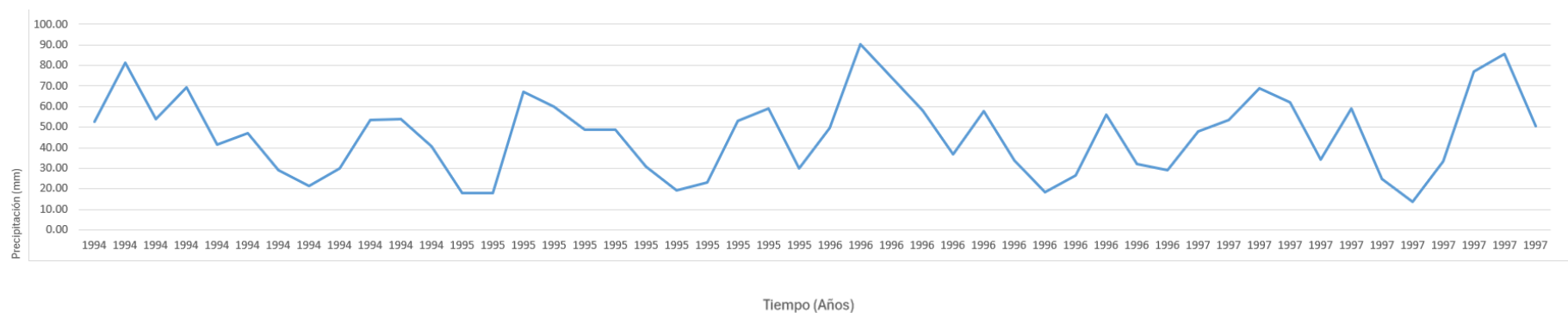


Figura 37. Serie de tiempo. Guamote (1994-1997).

Elaborado por: Autoría Propia

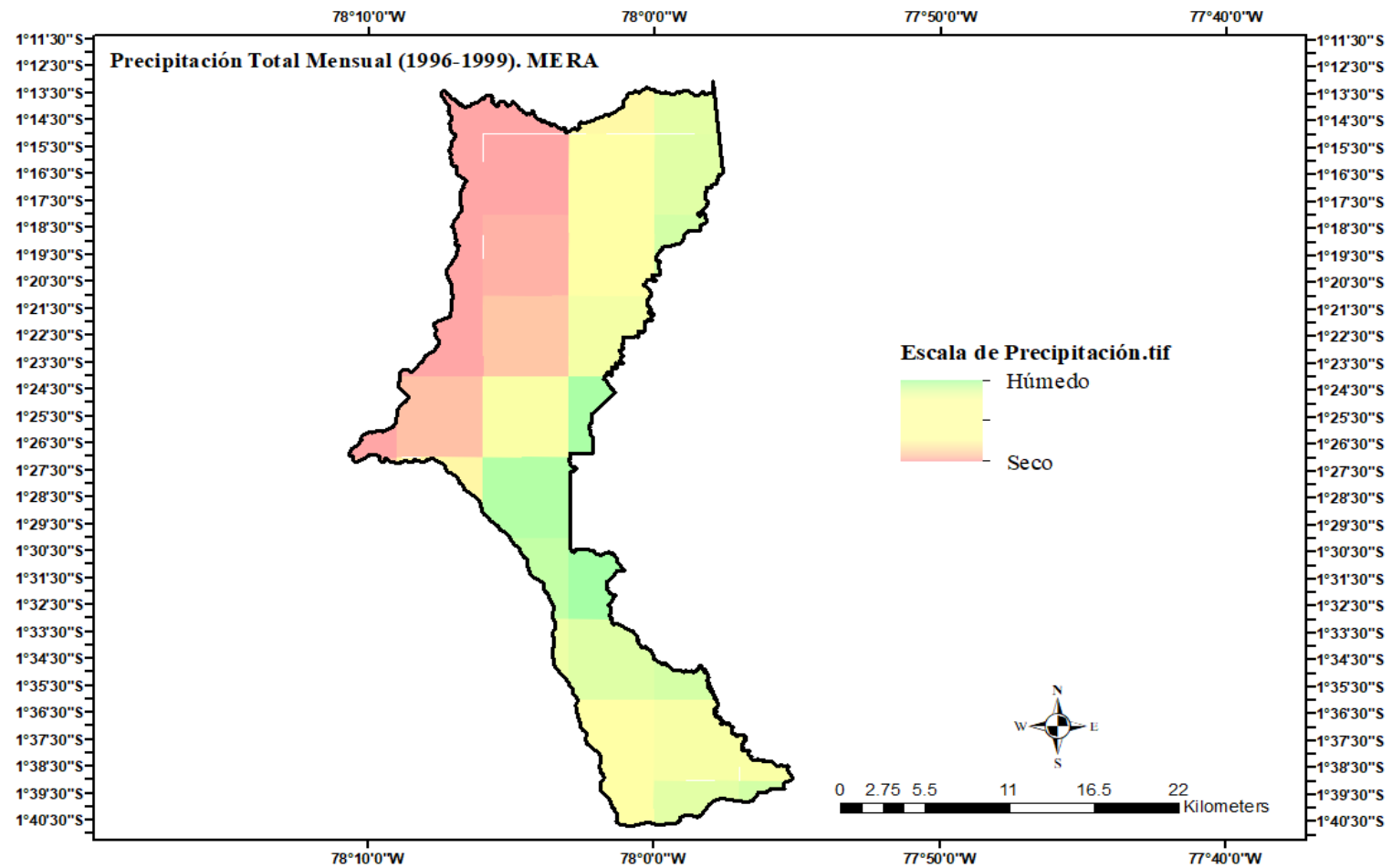


Figura 38. Mapa de precipitación Mera (1996-1999).

Elaborado por: Autoría Propia

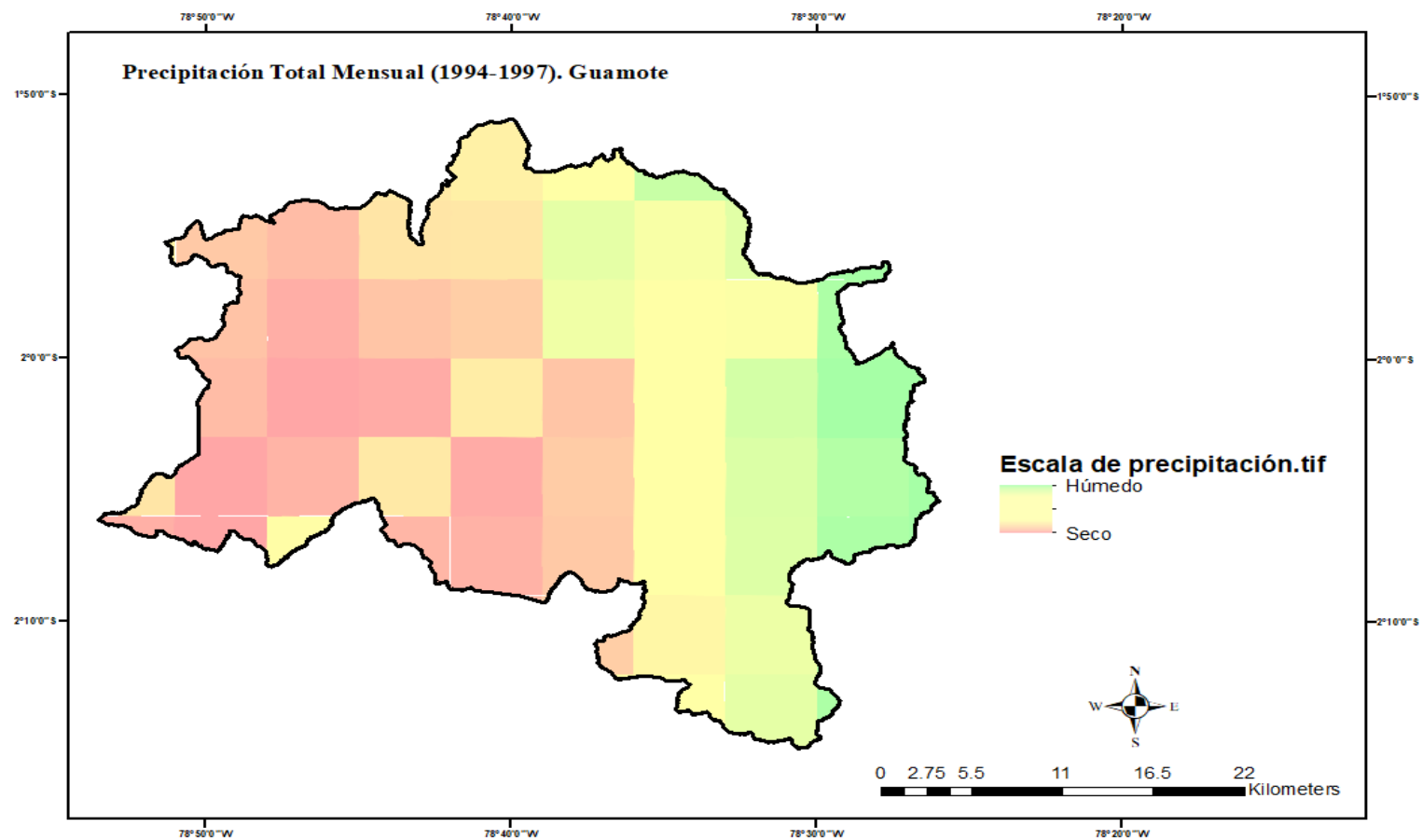


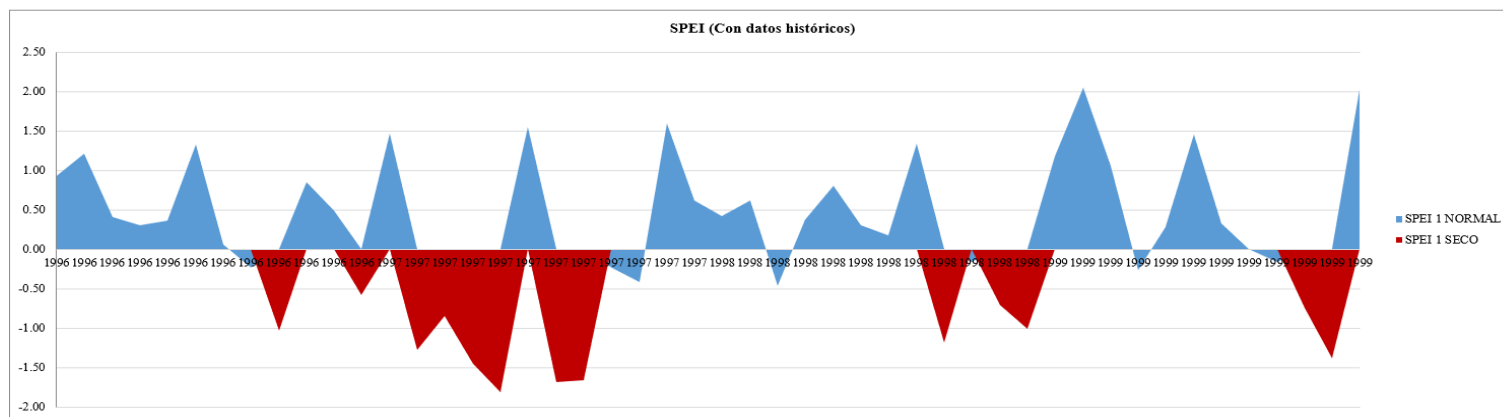
Figura 39. Mapa de precipitación Guamote (1994-1997).

Elaborado por: Autoría Propia

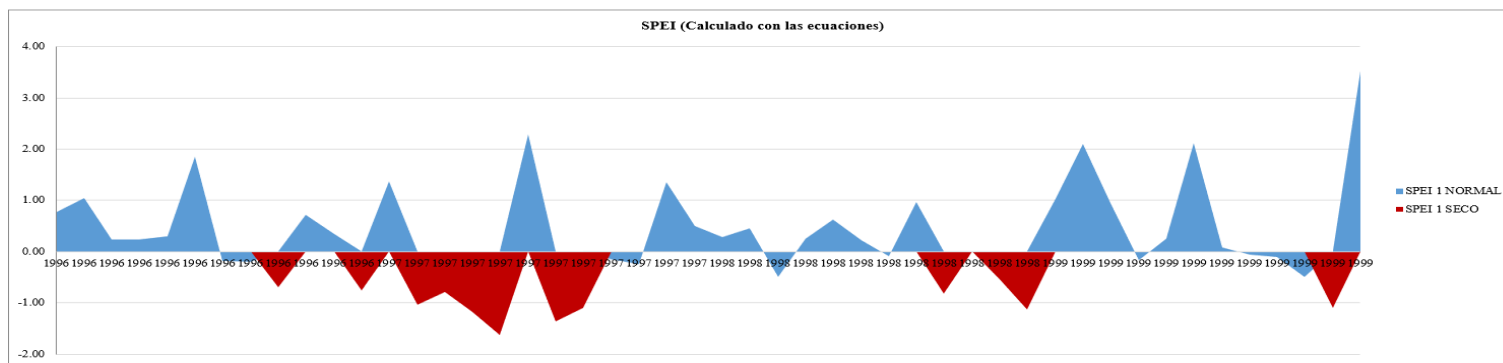
Observamos que para la serie de tiempo de los años de validación propuesto para Mera (Figura 36), existen cambios abruptos de niveles de precipitación, superando picos de hasta más de 700 mm de acumulación de lluvias, por otro lado, existen niveles poco mayores de 100 mm, esto demuestra que Mera es una zona húmeda, pues la cantidad de precipitación es considerable aún en las zonas que se consideran más secas. En contraste con el mapa de precipitaciones (Figura 38) podemos notar cuales fueron las zonas con menores cantidades de precipitación y estas mismas se encuentran al Noroeste del cantón Mera. Mientras que al Norte-centro y en el Sur del mapa las precipitaciones son medias y altas.

Para el cantón Guamote, su serie de datos (Figura 37) muestra una varianza pequeña y los valores mayores son de 90 mm el máximo y picos bajos, mayores a 10 mm, demostrando que esta es una zona de pocas precipitaciones; en la serie de tiempo se nota bastante consistencia y homogeneidad. En el mapa de precipitaciones de Guamote (Figura 39) se reafirma lo antes dicho, se puede observar que se encuentra dividido en zonas relativamente húmedas y en zonas secas. Al oeste del mapa se pueden ver las partes más secas y en su contraparte al este se encuentran las zonas más húmedas.

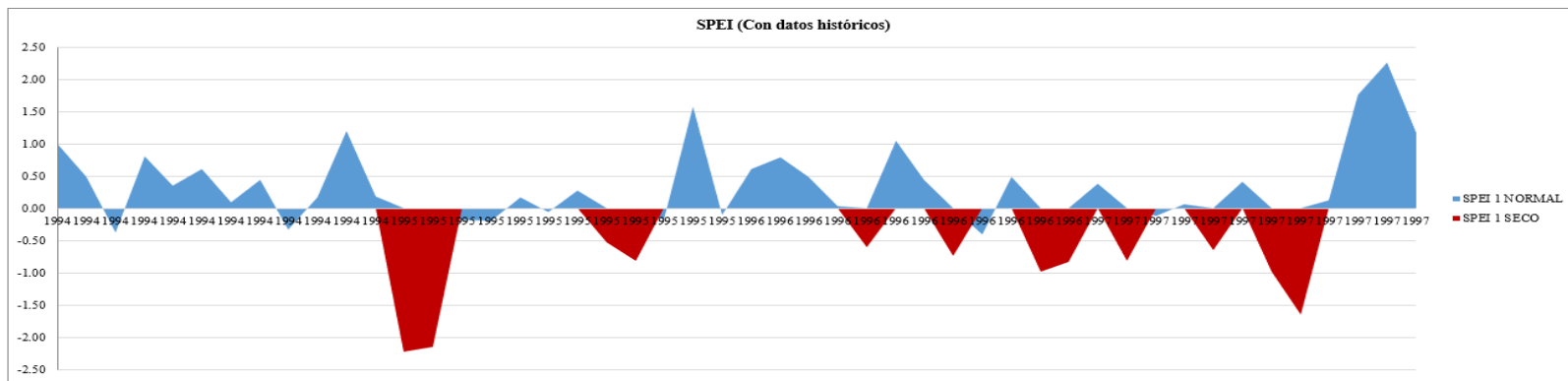
Lo siguiente es realizar el SPEI1 para los cuatro meses de estudio, estos mismos deberán demostrar lo antes analizado en las series de datos y mapas de precipitación. Y más importante se verificará la figura que se obtiene con los datos observados (Figuras 40 y 42) y la que se obtiene con las ecuaciones, es decir los simulados o pronosticados (Figuras 41 y 43).



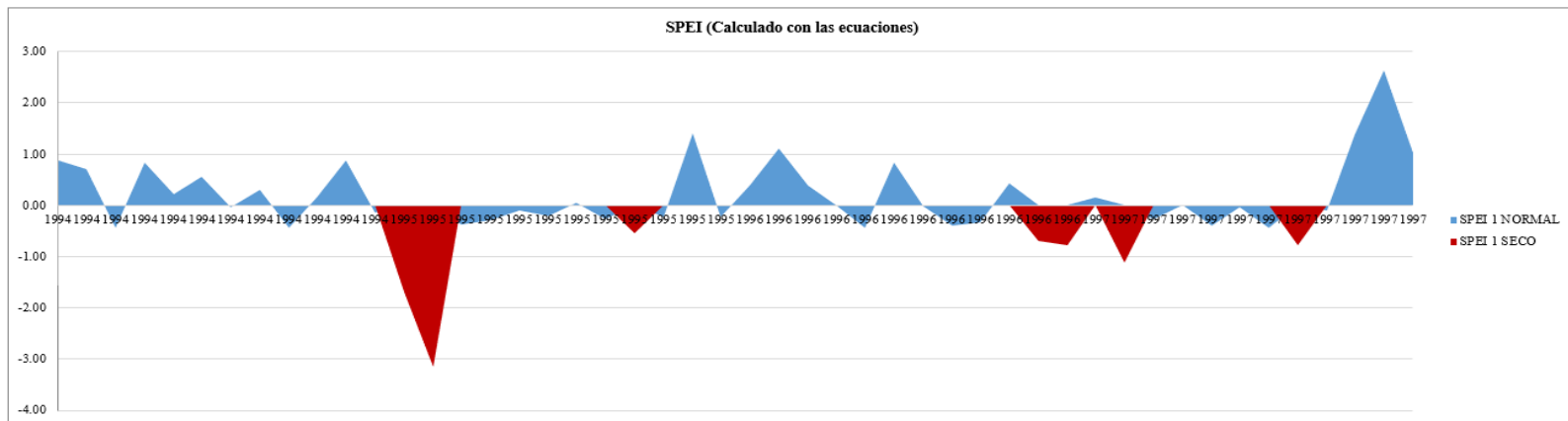
Elaborado por: Autoría Propia



Elaborado por: Autoría Propia



Elaborado por: Autoría Propia



Elaborado por: Autoría Propia

En la Figura (40) y (41) para el cantón Mera se muestra el SPEI1 observado y pronosticado, lo primero que logramos recalcar es que existe bastante coincidencia entre las dos figuras, notando que en el pronosticado los valores que calcula se ven con un valor menor, es decir los picos de humedad se ven más bajos y los picos de sequía se ven menos críticos. Y exactamente pasa lo mismo para las Figuras (42) y (43) del cantón Guamate.

Mediante este análisis visual se observa bastante similitud; sin embargo, para estas dos estaciones se debe comprobar mediante análisis matemáticos lo observado, por ello se realiza el cálculo del coeficiente de correlación de Pearson y del coeficiente de determinación en las Tablas (20 y 21).

Tabla 20

Coeficiente de Pearson entre resultados observados y pronosticados con las ecuaciones del cantón Mera.

Correlación	
Pearson	0.95
R^2	0.90

Tabla 21

Coeficiente de Pearson entre resultados observados y pronosticados con las ecuaciones del cantón Guamate.

Correlación	
Pearson	0.94
R^2	0.88

Nota: Como se observa tanto en las gráficas como en los resultados de correlación de Pearson y el de R^2 que los datos son confiables en cierta medida.

Coeficiente de eficiencia (NSE) para el modelo de predicción

Ahora se aplicará un coeficiente de eficiencia (Tablas 22-23) que sirve para evaluar la efectividad de los modelos de predicción hidrológicos.

Tabla 22

Coeficiente de eficiencia (NSE). Mera.

Nash-Sutcliffe	
SPEI1	0.89

Tabla 23

Coeficiente de eficiencia (NSE). Guamate.

Nash-Sutcliffe	
SPEI1	0.88

Nota: Haciendo uso de la metodología mientras más cerca se encuentre de 1 el modelo es más exacto. Por ende el coeficiente de eficiencia es muy bueno.

4.2 Discusión

El análisis de correlación entre las estaciones satelitales y terrestres para el cantón Mera, arrojó un coeficiente de Pearson de $R=0,44$ y para el cantón Guamote de $R=0,73$. De esta manera teniendo en cuenta el rango de valores para las pruebas de Pearson se llega a la deducción que estas matrices históricas se encuentran en una correlación directa y se puede notar que en Guamote se obtiene un R elevado en comparación con el resultado obtenido del cantón Mera; sin embargo hay que tener en cuenta que esta relación mayor, puede deberse al relleno de valores pues la estación terrestre de este cantón es la que presentó un déficit de datos de 341 de un total de 432. Definitivamente el comprobar que los datos satelitales son confiables es uno de los pasos primordiales, según el estudio de López-Bermeo, en 2022, el objetivo es precisamente comprobar la validez de los datos de precipitaciones del satélite CHIRPS y llegan a inferir que es una fuente de información confiable y aceptable para analizar la precipitación anual e interanual, al nosotros hacer la correlación de Pearson vemos que no es tan buena ya que el estudio es por mes, por ejemplo en Mera el valor está más cerca de 0 que de 1, pero aun así se está en un rango aceptable.

El estudio de la microcuenca del Rio Chulco en Ecuador de Zhiña, en 2016, muestra el índice de precipitación estándar (SPI). Es decir, solo se trabaja con datos de precipitación, cabe recalcar que utiliza ventanas de una, tres y seis meses debido a que solo hay un punto de estudio mientras que para nuestro caso se realiza el cálculo de índices de precipitaciones SPI y SPEI, para ventanas de uno y doce meses. Debido a que se trabaja con una gran cantidad de datos y con el objetivo de constatar y observar el nivel de sequías se utiliza para graficar los resultados para doce meses y se muestran en las Figuras (27) y (28) para el cantón Mera, donde se constata que existen mayores resultados de precipitación positiva con un total de datos de 286 y valores de sequía de 135; sin embargo, entre los años 1992-1993, según los rangos de las Tablas (2) y (3), se ve que se llega a una sequía extrema. Para el cantón Guamote observamos que en las Figuras (29) y (30) de igual forma denotan mayor cantidad de índices positivos de 266 y de valores de sequía de 155, también vemos un déficit de precipitaciones en el año 1992 igual llegando a una sequía peligrosa de -2. Aquí nos podemos dar cuenta de que en el año 1992 tanto para Mera y Guamote se registraron sequías de alto nivel aun teniendo en cuenta que se hallan en regiones diferentes. Mientras que en el estudio de comparación lo único que podemos contrastar, debido a que estamos en diferentes zonas de análisis, es que el año 1985 fue el de mayor sequia para este sector, también llegando a una sequía extrema, en un año en específico.

En el modelo matemático de predicción a través del análisis de regresión lineal múltiple los resultados obtenidos responden de manera positiva a una correlación directa entre la variable dependiente (Índice de precipitación estándar) y las variables independientes (precipitación, temperatura máxima, temperatura mínima, año y mes), siguiendo una distribución normal, se optó por tomar una ecuación para cada mes, es decir de enero hasta diciembre el valor de las ecuaciones cambia solo en dicha variable, dando como resultado final un total de doce ecuaciones de predicción para cada mes, en su

respectiva estación. Ahora con las ecuaciones obtenidas del análisis de regresión lineal múltiple, se calcula con los mismos datos de entrada para este periodo de estudio; así podemos comparar para Mera las Figuras (36) y (37) y para Guamote las Figuras (38) y (39), nos damos cuenta de que se sigue una misma tendencia, las gráficas son similares y la variación más notoria que se ve es que calcula valores un poco menores a los resultados observados. Para este caso se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson y el R^2 , arrojando valores de $R=0,95$; $R^2=0,90$ y $R=0,94$; $R^2=0,88$ para Mera y Guamote respectivamente. Utilizando esta metodología los valores que hemos obtenidos se encuentran en un rango de valoración excelente, casi acercándose a una correlación directa perfecta. Según el análisis del ajuste de modelos de regresión en hidrología de Smith & Campuzano, presentan un caso de estudio sobre la capacidad predictiva de un modelo de regresión y aquí se obtuvo un coeficiente de correlación de Pearson de $R= 0,62$ y un coeficiente de determinación de $R^2=0,39$ a la idea que llegan con estos resultados es que hay una correlación significativa y el valor de determinación arroja un valor pequeño el cual indica que es baja la variabilidad de los datos. Como vemos en este caso nuestro análisis de regresión lineal múltiple tiene una mayor correlación, los datos son más confiables.

Sometiendo los resultados a un coeficiente de validación que se especializa en modelado hidrológico, se calcula el índice Nash Sutcliffe; para el cantón Mera tenemos un coeficiente $NSE= 0,89$ y para el cantón Guamote $NSE=0,88$. Así pues la interpretación de los resultados es que se tiene un ajuste casi perfecto lo que indica una coincidencia alta entre los valores de la data histórica y los simulados con las ecuaciones. Por otro lado según Zhiña, en 2016, en su estudio de la microcuenca del río Chulco en Ecuador, muestra que su resultado de SPI1 arroja un valor bajo de $NSE=0,047$; sin embargo, para el SPI6 el valor es de $NSE= 0,84$ el cual muestra un excelente resultado, dando como conclusión que haciendo el SPI6 arroja valores más fuertes y los niveles de predicción son mejores en los primeros tres meses de simulación. En el caso de este estudio para un SPEI1, el NSE resulta aún mejor, esto puede deberse a varios factores como por ejemplo la robusta base de datos que se obtuvo y a que se trabajó tanto con datos terrestres como satelitales y al análisis de consistencia y homogenización previo a la obtención de los resultados. Además, las ecuaciones obtenidas en este estudio no se limitan a un número específico de meses, por el contrario, la validación de datos se puede hacer escogiendo cualquier periodo al azar.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- La definición de los índices de sequía de los cantones Guamote (Chimborazo), Mera (Pastaza), permitió comprender de manera precisa y detallada la variabilidad climática existente en estos cantones. Por medio de este análisis, se pudo identificar periodos críticos por ejemplo se determinó que para ambos cantones la sequía máxima fue en el año 1992 y la precipitación más elevada alrededor del año 2011, tomando en consideración la temperatura y el historial (mensual-anual) de los cantones estudiados.
- El análisis de bases de datos de precipitaciones y temperatura, con datos obtenidos con información terrestre (INAMHI) y datos satelitales (CHIRPS), ha permitido una caracterización detallada de las zonas de estudio. Al integrar estos datos, se obtiene una visión más precisa de la distribución espacial y temporal de los periodos de precipitaciones.
- Los datos proporcionados por información terrestre (INAMHI) no fueron suficientes para realizar el análisis y correlación de datos necesarios para cumplir con el objetivo de la investigación, pues en el cantón Guamote el número de datos existentes fueron insuficientes mostrando un faltante de 341 datos y en cantón Mera igual se evidenció 17 datos faltantes, ambos de un total de 432 datos.
- La información satelital (CHIRPS) proporcionó información suficiente y detallada de las precipitaciones en las zonas estudiadas, lo cual facilitó el desarrollo de la investigación, se pudo obtener datos por días y luego convertirlo a mensuales, todos estos datos estuvieron completos.
- La homogenización de datos de las precipitaciones en ambos cantones permitió obtener información parcializada y uniforme que facilitó el estudio y la obtención de serie de datos que evidenció el comportamiento de las precipitaciones, con picos altos de mayores a 2 y bajos en periodos monótonos de incluso menores a 2, en el rango de los índices de precipitación.
- El desarrollo y validación de modelos matemáticos y computacionales para la predicción de sequías en la zona de estudio resultó interesante pues es una herramienta que permite anticipar el fenómeno de sequías, los resultados evidencian la importancia del desarrollo de una ecuación en consideración al tiempo y a las temperaturas, máximas y mínimas, en relación a constantes que fueron correlacionadas a través de métodos estadísticos y programables, las mismas que se acercan a la tendencia de los datos históricos.
- Se obtuvieron resultados que nos indican bastante correlación y eficiencia entre los modelos hidrológicos observados y pronosticados. Dando como resultado un coeficiente de correlación de Pearson y de determinación de alrededor de 0,90 y un coeficiente de eficiencia de 0,88. Otorgándonos una lista de ecuaciones que cuando menos pueden acercarse a la realidad y darnos una guía en la toma de decisiones para la prevención y mitigación de ocurrencia de sequías.

5.2 Recomendaciones

- Debido a la escasez de información en el cantón Guamote, el llenado de datos para el análisis estadístico fue más complicado, por ello, se recomienda que el INAMHI proponga y ponga a disposición una mayor cantidad de datos para así, disminuir la variabilidad de resultados y aumentar la confiabilidad de estos, logrando esto a través de la implementación y mejora de estaciones y un sistema de toma de datos más eficaz.
- Se propone investigar más detalladamente las propiedades como la temperatura, y su influencia en los resultados de precipitación sobre todo al hacer investigaciones en diferentes regiones del Ecuador, para así evitar desfases y obtener resultados más homogéneos debido a la variabilidad de esta.
- Se recomienda realizar mayores investigaciones que consideren diferentes periodos de tiempos adicionales a los empleados en el presente estudio, para comprobar mejor la influencia a corto y largo plazo y poder establecer una mejor correlación.
- Se recomienda también proponer futuras investigaciones que tengan como objetivo el encontrar una correlación entre las precipitaciones de un año a otro, comparándolas mes a mes, esto podría generar una media de datos de precipitación y temperatura para años futuros y así reforzar este modelo predictivo.

BIBLIOGRAFÍA

- Arias, J. (2022). *TIPOS, ALCANCES Y DISEÑOS DE INVESTIGACIÓN*.
<https://blogs.ugto.mx/mdued/wp-content/uploads/sites/66/2022/10/Tipos-alcances-y-disenos-de-investigacion-paginas-66-79.pdf>
- Calculadora del coeficiente de eficiencia del modelo Nash Sutcliffe*. (n.d.). Retrieved February 4, 2025, from <https://agrimetsoft.com/calculators/Nash%20Sutcliffe%20model%20Efficiency%20coefficient>
- Javier de Miguel. (2021). *Técnicas de recolección de datos: los 10 métodos más usados*.
<https://www.doofinder.com/es/blog/tecnicas-de-recoleccion-de-datos>
- López-Bermeo, C., Montoya, R. D., Caro-Lopera, F. J., & Díaz-García, J. A. (2022). Validation of the accuracy of the CHIRPS precipitation dataset at representing climate variability in a tropical mountainous region of South America. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 127, 103184.
<https://doi.org/10.1016/J.PCE.2022.103184>
- Podestá, G., De Los, M., Skansi, M., Herrera, N., & Veiga, H. (2020). *Centro Regional del Clima para el Sur de América del Sur Centro Regional do Clima para o Sul da América do Sul Descripción de índices para el monitoreo de sequía meteorológica implementados por el Centro Regional del Clima para el Sur de América del Sur*.
- Smith, R. A., & Campuzano, C. (n.d.). *XIV SEMINARIO NACIONAL DE HIDRAULICA E HIDROLOGIA ANÁLISIS DEL AJUSTE DE MODELOS DE REGRESIÓN EN HIDROLOGIA*.
- SPI. (2012). *Índice normalizado de precipitación - Guía del usuario*.
- Villón, M. (2006). *HIDROLOGIA ESTADISTICA*.
- Zhiña, D., Pacheco, J., & Avilés, A. (2016). *Modelos estocásticos para el pronóstico de sequías en la microcuenca del río Chulco en Ecuador*.

ANEXOS

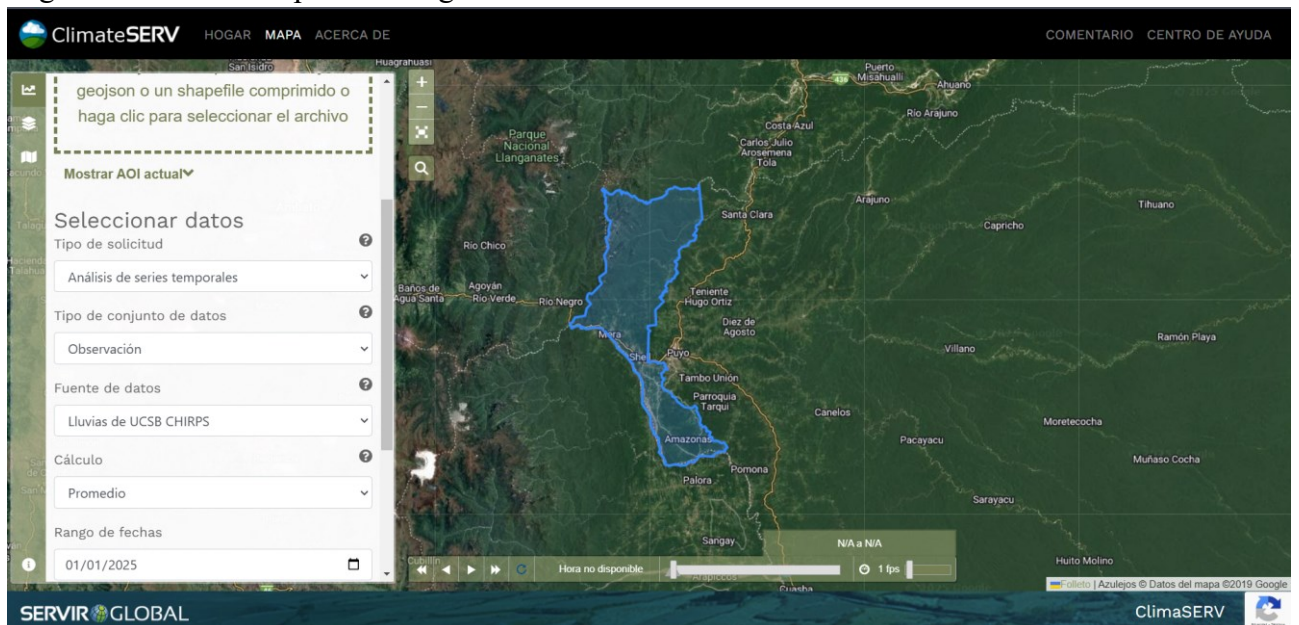
Anexo 1

Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI). Visor Hidro-Meteorológico



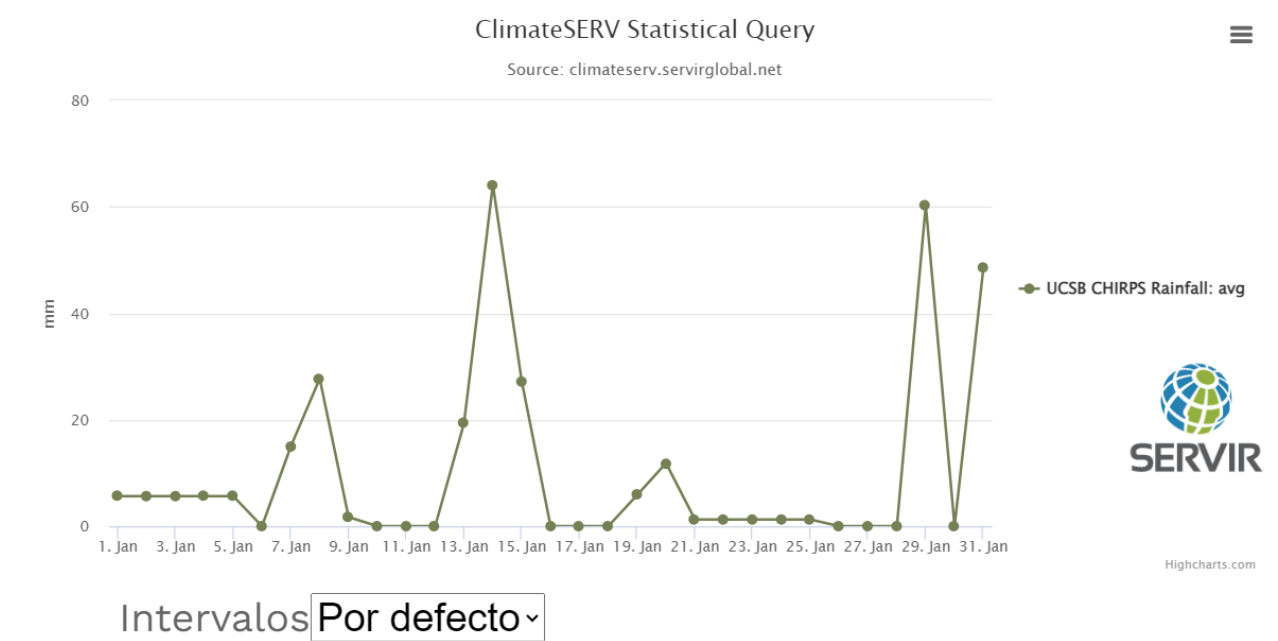
Anexo 2

Página ClimateSERV para descarga de datos CHIRPS



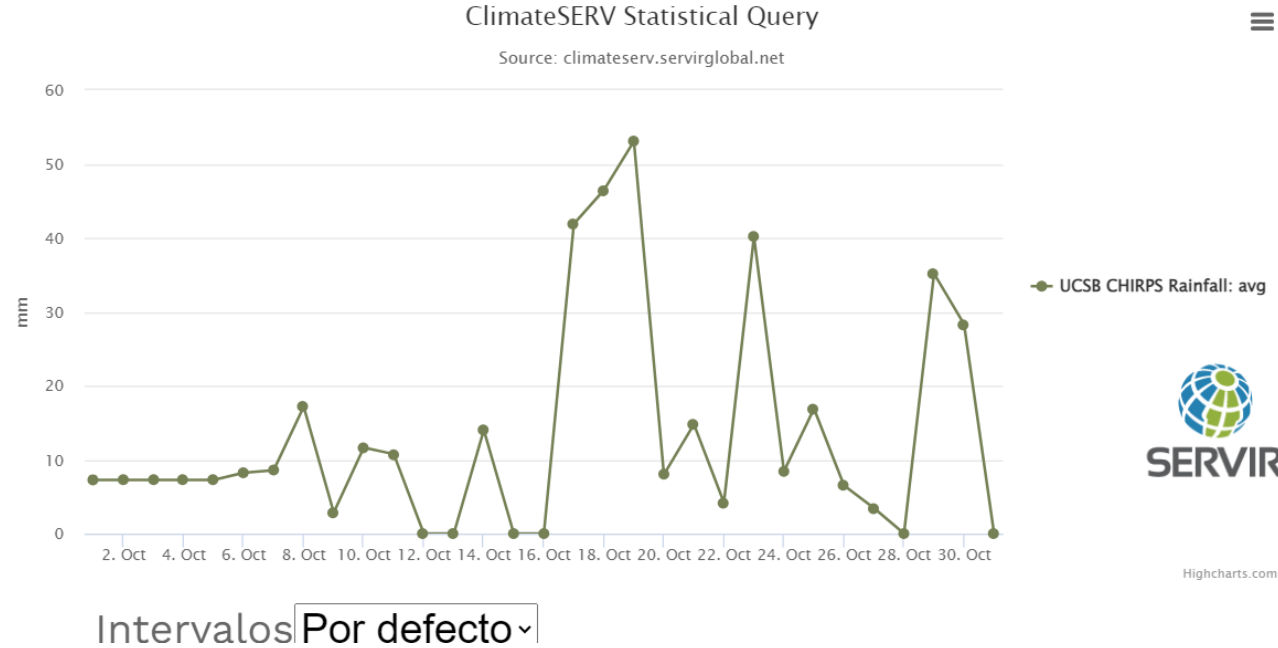
Anexo 3

Gráfica ClimateSERV. Mensual (Cantón Mera, enero 1986)



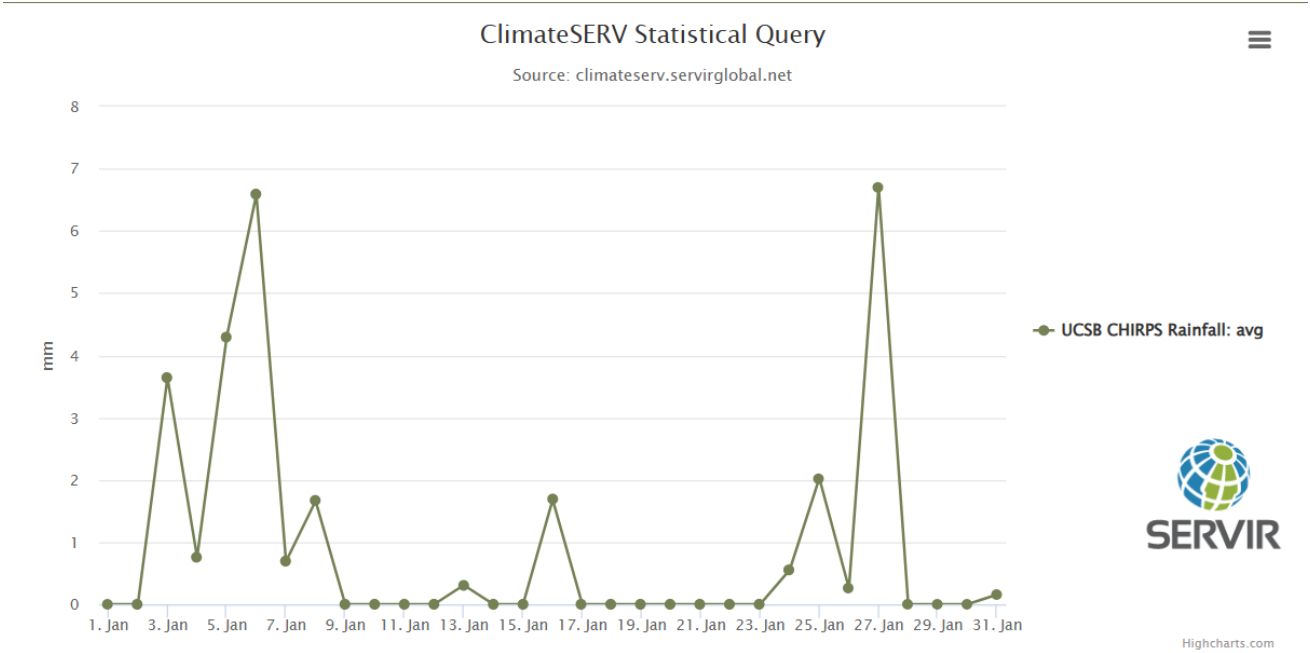
Anexo 4

Gráfica ClimateSERV. Mensual (Cantón Mera, octubre 1990)



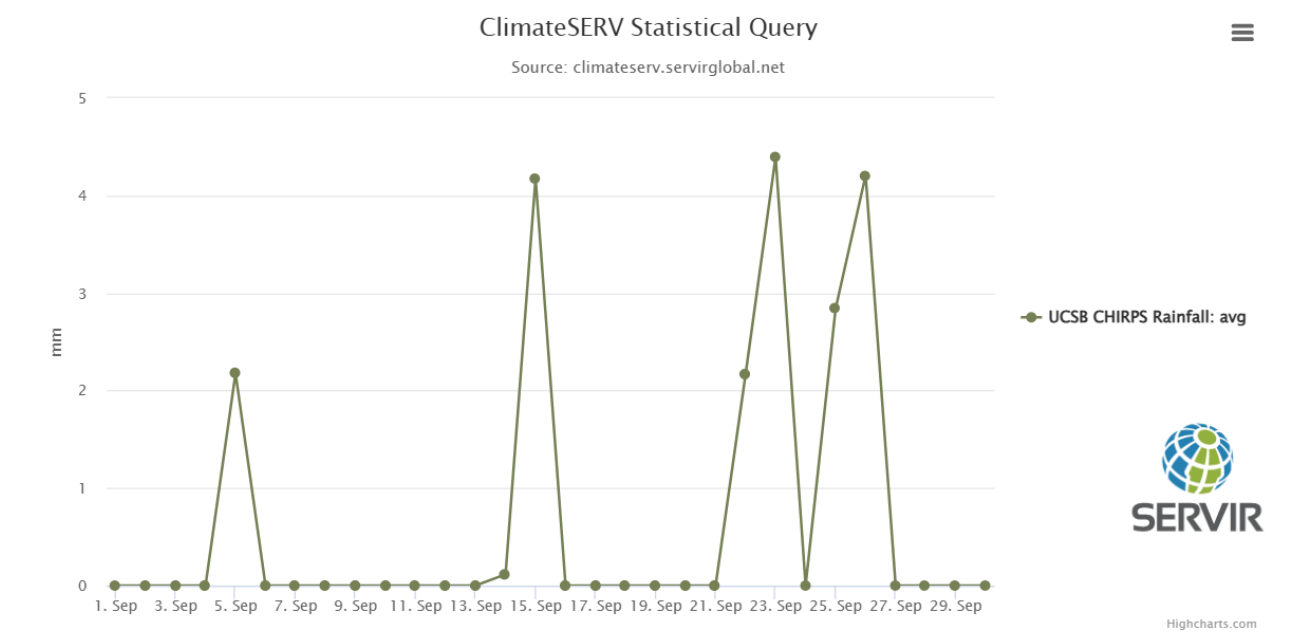
Anexo 5

Gráfica ClimateSERV. Mensual (Cantón Guamote, enero 1986)



Anexo 6

Gráfica ClimateSERV. Mensual (Cantón Guamote, octubre 1990)



Anexo 7

Programación RStudio para relleno de datos precipitación (Paquetes de códigos)

```
## RELLENO DE DATOS DE PRECIPITACIÓN TOTAL MENSUAL (mm).

## AUTORES: MARCO ALEXANDER MENDOZA OLMEDO
##          BRYAN STIVEN BONIFAZ TENE
#

#Limpieza del environment
clc <- function() cat ('\014')
clc ()
rm(list=ls())
dev.off()

#

#Instalación de paquetes
ipak <- function(pkg){
  new.pkg <- pkg[!(pkg %in% installed.packages()[,'Package'])]
  if (length(new.pkg))
    install.packages(new.pkg, dependencies= TRUE)
  sapply(pkg, require, character.only= TRUE)
}
#Usage
packages <- c('readxl','tidyverse', 'cluster', 'factoextra', 'NbClust', 'rstatix',
              'ggpubr','hydroTSM','psych','xts','forecast','zoo', 'lubridate',
              'missForest', 'ggplot2', 'gganimate', 'gifski', 'gapminder',
              'latticeExtra', 'lattice', 'UsingR', 'car', 'tseries', 'foreign',
              'astsa', 'stats', 'magrittr', 'palmerpenguins', 'mice', 'openxlsx',
              'jpeg', 'png', 'VIM', 'Hmisc', 'corrplot', 'gclus', 'PerformanceAnalytics',
              'naniar', 'fs', 'imputeTS')

ipak(packages)

#
#Ubicar la carpeta de entrada

setwd('C:/Users/BRYAN/Desktop/1. Perfil tesis/Resultados/MissForest/DatosH')

#
```

```

#Matriz de correlación entre estaciones

pre1 <- df[,-1]
pre1 <- rcorr(as.matrix(pre1,ncol=2))
data1 <- pre1$r
corPlot(data1,cex= 1.1,cex.axis=0.8, main= 'Matriz de corelacción entre estaciones')

corrplot(data1, method = 'number', type= c('lower'),mar= c(1, 1, 1, 1))

#
#COMPLETACIÓN DE DATOS CON missForest (sirve para imputar datos)

sapply(date.matrix,class) #comprobar la clase de los datos

#Hacer la imputación

imp <- missForest(date.matrix,maxiter = 15, verbose = TRUE,
                  variablewise = FALSE, mtry = floor(sqrt(ncol(date.matrix))),
                  replace = TRUE, parallelize = c("no", "variables", "forests"))
imp$OOBError

imp <- missForest(date.matrix,maxiter= 18, verbose = TRUE,
                  variablewise = TRUE,mtry = floor(sqrt(ncol(date.matrix))),
                  replace = TRUE, parallelize = c('no', 'variables', 'forests'))
imp$OOBError
sapply(date.matrix,class)
dfimp <- as.data.frame(imp$ximp)
gar.imp <- round(dfimp,2)

#
#Ubicar la carpeta de entrada

setwd('C:/Users/BRYAN/Desktop/1. Perfil tesis/Resultados/MissForest/DatosH')

#
#Cargar archivos xlsx
df <- read_xlsx('Matriz_data.xlsx')

#
#Manipulación de datos para el trabajo

class(df)
summary(df)
idx <- as.Date(df$Date)
date.matrix <- as.data.frame(df[,-1])

#
#Obrevacion de datos faltantes
str(date.matrix)

#
#Grafica de los datos existentes
date.xts <- as.xts(date.matrix,order.by = idx)
date.zoo <- as.zoo(date.xts)
summary(date.zoo)
Ymax <- max(date.zoo, na.rm= T)
Ymax
xyplot(date.zoo, main= 'Datos de las precipitaciones existente de Guamote y Mera',
       xlab='Tiempo_año',
       col=c('red', 'black', 'midnightblue', 'green', 'mediumblue', 'lightsalmon3',
             'navy', 'mediumaquamarine', 'orange', 'seagreen', 'palevioletred1',
             'royalblue1'),
       ylim=c(0,Ymax),frequency=80)

```

```

#Grafica de los datos completos

summary(date.zoo.compl)
Ymax1 <- max(date.zoo.compl, na.rm= T)
Ymax1

xyplot(date.zoo.compl, main= 'Datos de las precipitaciones completas de Guamote y Mera',
       col=c('red', 'black', 'midnightblue', 'green', 'mediumblue', 'lightsalmon3',
             'navy', 'mediumaquamarine', 'orange', 'seagreen', 'palevioletred1',
             'royalblue1' ),
       ylim=c(0,Ymax1),xlab='Tiempo_año')

#

#Ploteo de histogramas MERA (INAMHI)
hydroplot(as.zoo(date.xts.compl[,1]),na.rm=TRUE,var.type='Precipitation',
          pfreq='ma', xlab= 'Tiempo', ylab= 'Pp',
          col=c('midnightblue', 'olivedrab2', 'steelblue1'),
          main=names(date.xts[,1]))

#Ploteo de histogramas MERA (CHRIPS)
hydroplot(as.zoo(date.xts.compl[,2]),na.rm=TRUE,var.type='Precipitation',
          pfreq='ma', xlab= 'Tiempo', ylab= 'Pp',
          col=c('midnightblue', 'olivedrab2', 'steelblue1'),
          main=names(date.xts[,2]))

#Ploteo de histogramas GUAMOTE (INAMHI)
hydroplot(as.zoo(date.xts.compl[,3]),na.rm=TRUE,var.type='Precipitation',
          pfreq='ma', xlab= 'Tiempo', ylab= 'Pp',
          col=c('midnightblue', 'olivedrab2', 'steelblue1'),
          main=names(date.xts[,3]))

#Ploteo de histogramas GUAMOTE (CHRIPS)
hydroplot(as.zoo(date.xts.compl[,4]),na.rm=TRUE,var.type='Precipitation',
          pfreq='ma', xlab= 'Tiempo', ylab= 'Pp',
          col=c('midnightblue', 'olivedrab2', 'steelblue1'),
          main=names(date.xts[,4]))

#

```

Anexo 8

Programación RStudio para cálculo del SPI y SPEI

```

##          CÁLCULO DE ÍNDICES DE PRECIPITACIÓN.

##  AUTORES: MARCO ALEXANDER MENDOZA OLMEDO
##           BRYAN STIVEN BONIFAZ TENE
#

#Limpieza del environment
clc <- function() cat ('\014')
clc ()
rm(list=ls())
dev.off()

```

```

#
#Instalación de paquetes
ipak <- function(pkg){
  new.pkg <- pkg[!(pkg %in% installed.packages()[,'Package'])]
  if (length(new.pkg))
    install.packages(new.pkg, dependencies= TRUE)
  sapply(pkg, require, character.only= TRUE)
}
#Usage
packages <- c('readxl','SPEI', 'ggplot2', 'gganimate', 'gifski', 'jpeg', 'png')
ipak(packages)

#
#Ubicar la carpeta de entrada

setwd('D:/ALEXANDER/1. Ing. Civil/1. Tesis/Análisis/R_SPI')

#
#Cargar archivos xlsx
df <- read_xlsx('Mera_Tmin_Tmax_Pp.xlsx')
#
#                                     CÁLCULOS
#
#
#Cálculo el SPI a partir de la precipitación (Standardized Precipitation Index)
#
#Un mes
spi1 <- spi(df$Pp,1)
spi1
plot(spi1)

#Doce meses
spi12 <- spi(df$Pp,12)
spi12
plot(spi12)

#
#   Cálculo el SPEI a partir de la Pp, Tmin y Tmax (Standardized Precipitation
#   Evapotranspiration Index)
#
#Cálculo de la Evapotranspiración (ETP)

sapply(df,class)
attach(df)

#Hargreaves method

df$ETP_har <- hargreaves(Tmin, Tmax, lat= -1.4651)

#Balance
attach(df)
df$BAL <- Pp-ETP_har

```

```
#
#Cálculo del SPEI

#Un mes
df.matrix <- as.matrix(df)
spei1 <- spei(df.matrix[, 'BAL'], 1)
spei1
plot(spei1)

#Doce meses
spei12 <- spei(df.matrix[, 'BAL'], 12)
spei12
plot(spei12)
```

Anexo 9

Programación RStudio para el análisis de regresión lineal múltiple

```
## ANÁLISIS DE REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE. MODELO PREDICTIVO.

## AUTORES: MARCO ALEXANDER MENDOZA OLMEDO
## BRYAN STIVEN BONIFAZ TENE
#

#Limpieza del environment
clc <- function() cat ('\014')
clc ()
rm(list=ls())
dev.off()

#

#Instalación de paquetes
ipak <- function(pkg){
  new.pkg <- pkg[!(pkg %in% installed.packages()[, 'Package'])]
  if (length(new.pkg))
    install.packages(new.pkg, dependencies= TRUE)
  sapply(pkg, require, character.only= TRUE)
}
#Usage
packages <- c('readxl', 'openxlsx')
ipak(packages)

#

#Ubicar la carpeta de entrada

setwd('D:/ALEXANDER/1. Ing. Civil/1. Tesis/Modelo predictivo')

#

#Cargar archivos xlsx
df <- read_xlsx('Datos_Mera.xlsx')
```

```
#
#
# CÁLCULOS
#
#
#Análisis de regresión lineal
regresion <- lm(SPEI1 ~ Año + Mes + Pp + Tmax + Tmin,data=df )
summary(regresion)
#correlacion de pearson
#sqrt(0.9274)
plot(regresion)
write.xlsx(regresion, 'results.xlsx')

#
#
#Construir el modelo de predicción

newdata <- data.frame(Año= 2004, Mes='Octubre', Pp= 410 , Tmax= 22, Tmin= 11 )
predict(regresion,newdata)
```

Anexo 10

Resultados del análisis de regresión lineal múltiple. RStudio. Mera

```
Coefficients:
      Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) -3.393019   2.537521  -1.337   0.1819
Año          0.000278   0.001266   0.220   0.8263
MesAgosto    1.789390   0.081642  21.918 < 2e-16 ***
MesDiciembre  0.819836   0.064832  12.646 < 2e-16 ***
MesEnero     1.517430   0.066983  22.654 < 2e-16 ***
MesFebrero   1.496536   0.067361  22.217 < 2e-16 ***
MesJulio     0.425020   0.079882   5.321 1.69e-07 ***
MesJunio     -0.129026   0.072608  -1.777   0.0763 .
MesMarzo     0.396495   0.064146   6.181 1.52e-09 ***
MesMayo      0.266097   0.065137   4.085 5.29e-05 ***
MesNoviembre  0.752019   0.065181  11.537 < 2e-16 ***
MesOctubre   0.941636   0.067136  14.026 < 2e-16 ***
MesSeptiembre 1.676258   0.073792  22.716 < 2e-16 ***
Pp           0.009179   0.000129  71.131 < 2e-16 ***
Tmax        -0.072144   0.011814  -6.107 2.33e-09 ***
Tmin         0.026036   0.020617   1.263   0.2073
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.2695 on 416 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.9274,    Adjusted R-squared:  0.9248
F-statistic: 354.1 on 15 and 416 DF,  p-value: < 2.2e-16
```

Anexo 11

Resultados del análisis de regresión lineal múltiple. RStudio. Guamote

Coefficients:

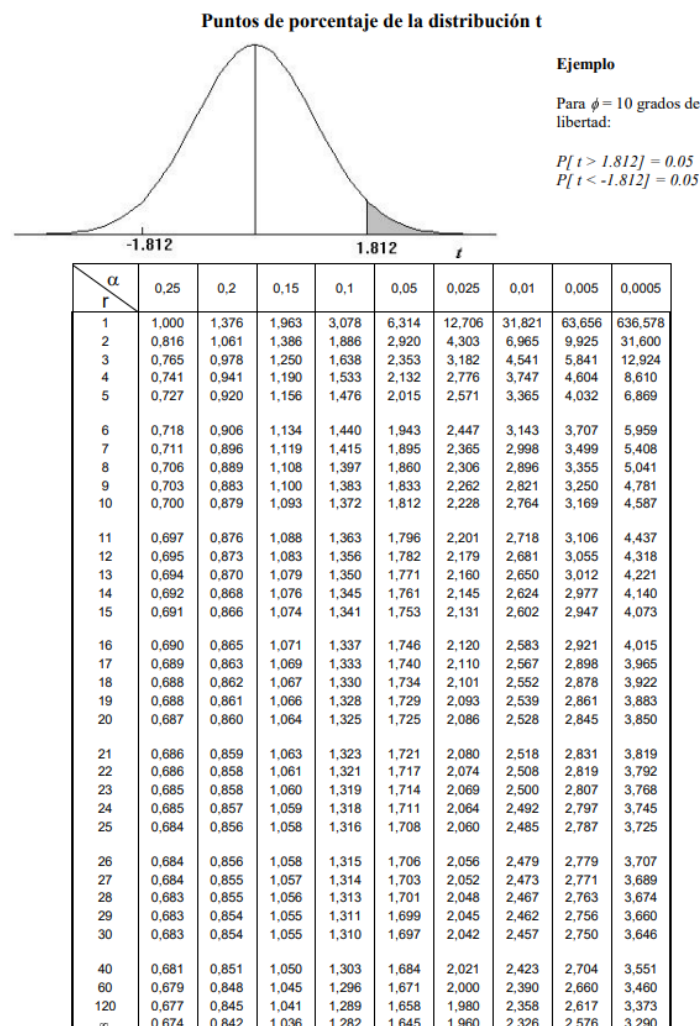
	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	3.5699653	3.1996129	1.116	0.26517
Año	0.0001297	0.0015899	0.082	0.93500
MesAgosto	2.3441828	0.1059429	22.127	< 2e-16 ***
MesDiciembre	1.5823112	0.0846480	18.693	< 2e-16 ***
MesEnero	1.1025466	0.0820994	13.429	< 2e-16 ***
MesFebrero	-0.8988736	0.0818077	-10.988	< 2e-16 ***
MesJulio	1.6435269	0.1007634	16.311	< 2e-16 ***
MesJunio	0.6500235	0.0899129	7.229	2.34e-12 ***
MesMarzo	-0.2429776	0.0799082	-3.041	0.00251 **
MesMayo	0.8137725	0.0823280	9.885	< 2e-16 ***
MesNoviembre	1.5609718	0.0865173	18.042	< 2e-16 ***
MesOctubre	1.1409613	0.0898863	12.693	< 2e-16 ***
MesSeptiembre	2.1004175	0.0995206	21.105	< 2e-16 ***
Pp	0.0551183	0.0011003	50.095	< 2e-16 ***
Tmax	-0.4344535	0.0240523	-18.063	< 2e-16 ***
Tmin	0.1819402	0.0189884	9.582	< 2e-16 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.3384 on 416 degrees of freedom
Multiple R-squared: 0.8857, Adjusted R-squared: 0.8816
F-statistic: 214.9 on 15 and 416 DF, p-value: < 2.2e-16

Anexo 12

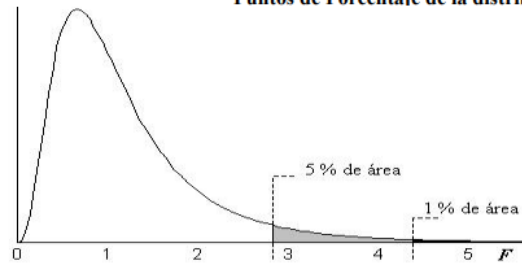
Tabla de valores T de Student, dos colas.



Anexo 12

Tabla de valores F de Fisher.

Puntos de Porcentaje de la distribución F



Ejemplo:

Para $n_1 = 9, n_2 = 12$ grados de libertad:

$P[F > 2.80] = 0.05$

$P[F > 4.39] = 0.01$

n ₂	5 % (normal) y 1 % (negritas) puntos para la distribución de F n1 grados de libertad (para el mayor cuadrado medio)																														n ₂																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	16	20	24	30	40	50	75	100	200	500	∞																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
1	161	199	216	225	230	234	237	239	241	242	243	244	245	246	248	249	250	251	252	253	253	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254