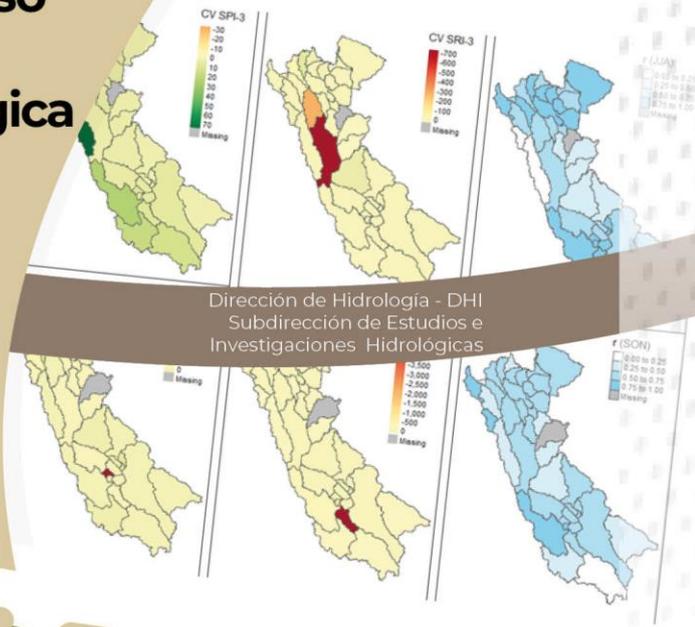


Impacto del cambio climático y uso del suelo en la propagación de la sequía meteorológica a la hidrológica en cuencas amazónicas del Perú



Septiembre
2023

Impacto del cambio climático y uso del suelo en la propagación de la sequía meteorológica a la hidrológica en cuencas amazónicas del Perú

Autores:

S. Endara y W. Lavado

Subdirección de Estudios e Investigaciones Hidrológicas - SENAMHI

Dirección de Hidrología – SENAMHI

Diseño y diagramación por:

M. Casaverde

Subdirección de Predicción Hidrológica - SENAMHI

Derechos Reservados

© Senamhi, septiembre 2023

Citar como:

Endara, S. & Lavado, W (2023), Impacto del cambio climático y uso del suelo en la propagación de la sequía meteorológica a la hidrológica en cuenca amazónicas del Perú. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú – SENAMHI.

<https://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/2915>

**Impacto del cambio climático y uso
del suelo en la propagación de la
sequía meteorológica a la hidrológica
en cuencas amazónicas del Perú**





DIRECTORIO

PhD. Guillermo Antonio Baigorria Paz
PRESIDENTE EJECUTIVO DEL SENAMHI

Ing. Oscar G. Felipe Obando
DIRECTOR DE HIDROLOGÍA DEL SENAMHI

PhD. Waldo Lavado Casimiro
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS E INVESTIGACIONES HIDROLÓGICAS DEL SENAMHI

Elaborado por:

Endara Huanca, Sofía Marisol y Lavado Casimiro, Waldo Sven.

Revisado por:

PhD. Waldo Lavado Casimiro
Subdirector de Estudios e Investigaciones Hidrológicas

Lima-Perú
Septiembre 2023

CONTENIDO

RESUMEN	1
1. INTRODUCCIÓN	2
Área de estudio	4
Climatología	4
2. DATOS Y MÉTODOS	6
2.1 Datos	6
2.1.1 Datos meteorológicos.....	6
2.1.2 Datos de escorrentía	6
2.1.3 Datos de uso de suelo	7
2.2 Métodos	7
2.2.1 Índice de Precipitación Estandarizado (SPI) e Índice de Escorrentía Estandarizada (SRI)	7
2.2.2 Índice de intensidad de propagación de la sequía (DPI)	8
2.2.3 Coeficiente de correlación retardado	9
3. RESULTADOS	9
3.1 Respuesta interdecadal en la propagación de la sequía meteorológica a la hidrológica	9
3.2 Respuesta estacional en la propagación de la sequía meteorológica a la hidrológica	11
3.3 Respuesta mensual en la propagación de la sequía meteorológica a la hidrológica	14
3.4 Impacto del cambio climático en la propagación de la sequía meteorológica a la hidrológica	16
3.5 Impacto del uso del suelo en la propagación de la sequía meteorológica a la hidrológica: caso Intercuenca Alto Huallaga	17
4. CONCLUSIONES	18
5. REFERENCIAS	18
ANEXOS	20

Lista de Figuras

Figura 1. Usos del agua por sectores económicos	4
Figura 2. Mapa clasificación climática, SENAMHI (1981-2010), Digitalizado 2020.....	5
Figura 3. Área de estudio	6
Figura 4. Flujo de trabajo	9
Figura 5. Características interdecadales en las cuencas amazónicas del Perú. a) y b) Pendiente de SPI-12 y SRI-12. c) y d) coeficiente de variación de SPI-12 y SRI-12 e) correlación lineal entre SPI-12 y SRI-12.	10
Figura 6. Característica estacional de variabilidad (CV) y asociación lineal (r) entre el SPI-3 y SRI-3 en cuencas amazónicas para DEF (diciembre, enero y febrero) y MAM (marzo, abril y mayo).....	11
Figura 7. Característica estacional de variabilidad (CV) y asociación lineal (r) entre el SPI-3 y SRI-3 en cuencas amazónicas para JJA (junio, julio y agosto) y SON (setiembre, octubre y noviembre).	12
Figura 8. Variaciones estacionales del DPI en 41 cuencas amazónicas para cada década.	14
Figura 9. Time delay correlation entre el SPI-1 y SRI-1 en las cuencas andinas	15
Figura 10. Boxplot de la dinámica de propagación de la sequía meteorológica a la hidrológica sin retraso (k=0) para cada estación del año.	15
Figura 11. Tendencia en la precipitación anual y en la evapotranspiración en cuencas amazónicas.	16
Figura 12. Evolución temporal de índices SPI-12 y SRI-12 en la Cuenca alto Huallaga.....	17

Lista de Tablas

Tabla 1. Clasificación de índice de precipitación estandarizado (SPI) e	8
Tabla 2. Clasificación del índice de intensidad de propagación de la sequía	8

RESUMEN

La sequía es uno de los fenómenos naturales más devastadores a nivel global, debido a sus impactos en los sectores económicos y principalmente en la agricultura, afectando a un 40% de la población mundial (FAO, 2022). En esta línea, los cambios de usos de suelo en la propagación de la sequía meteorológica a la hidrológica son de gran importancia para el pronóstico de sequías hidrológicas y prevención y mitigación de desastres por sequía.

El presente trabajo tuvo por objetivo: (1) Analizar las características espaciales y temporales de la propagación de la sequía meteorológica a la sequía hidrológica en cuencas amazónicas en el Perú en los últimos 40 años. (2) Determinar los cambios de uso de suelo en la propagación de la sequía meteorológica e hidrológica. La metodología consistió en el cálculo de índices de sequía meteorológica e hidrológica utilizando índices estandarizados a distintas escalas de tiempo, posteriormente se realizó un análisis de correlación de Pearson para medir el grado de relación entre la sequía meteorológica e hidrológica y un método de *machine learning* para el cálculo de cambios de usos de suelo para la cuenca Intermedio Alto Huallaga.

Los resultados mostraron, una tendencia positiva en la sequía meteorológica en los últimos 40 años, este aumento se debe en intensidad de la sequía en todas las cuencas analizadas. En cuanto a la sequía hidrológica ha habido menor intensidad desde los 80s a los 20s pero con mayor frecuencia en las últimas décadas. Así, una fuerte propagación de la sequía meteorológica a la hidrológica en las primeras dos décadas sobre todo en la estación de verano de diciembre a febrero en términos estacionales evidenciando valores de DPI mayores a 1. A la escala mensual según el SPI-1 y el SRI-1 las mayores correlaciones positivas y significativas se tiene con un lag=0, esto indica que si sucede una sequía meteorológica podría suceder en simultáneo un hidrológica en las cuencas andinas amazónicas.

Palabras clave: sequía, sequía meteorológica, sequía hidrológica, cambio climático, uso de suelo.

Impacto del cambio climático y uso del suelo en la propagación de la sequía meteorológica a la hidrológica en cuencas amazónicas del Perú

1. INTRODUCCIÓN

La sequía es considerada uno de los desastres naturales más dañinos en términos económicos (Wilhite et al., n.d.) por sus impactos directos e indirectos en los sectores económicos como la gestión de recursos hídricos en sus usos agrícola y poblacional principalmente. A diferencia de otros peligros naturales, la sequía se desarrolla lentamente, haciendo complejo determinar el inicio y el término del evento (Barker et al., 2016). Con el fin de evaluar la severidad de la sequía y medir sus impactos, es necesario un efectivo monitor de sequías (Akinyemi, 2021), donde los usuarios puedan obtener la información de las condiciones de sequía en distintas escalas de tiempo y espacio para un mejor manejo en la gestión de los recursos hídricos.

El cambio de uso de suelo, representa cambios significativos del paisaje terrestre, inducidas principalmente por la actividad humana en el último siglo. Estos cambios, son impulsados por la expansión urbana, la agricultura intensiva, la minería y otros procesos industriales, que vienen alterando de manera fundamental la estructura y función de los ecosistemas terrestres. A medida que los procesos antropogénicos continúan intensificándose aumentando los niveles de temperatura global, la relación entre el cambio de uso de suelo y los eventos climáticos extremos viene siendo tema de investigación entre los países. Así, el cambio climático ha contribuido en el aumento de las condiciones climáticas extremas, en frecuencia, duración y severidad de los episodios de sequía, por consecuencia han aumentado durante la última década (Zhou et al., 2019). Las proyecciones climáticas nos indican que las sequías serán más frecuentes y graves (más graves que las de 1980-2010) particularmente en México, Estados Unidos, América, América del Sur y mayormente África (NATIONS OFFICE FOR DISASTER RISK REDUCTION, 2021).

El estudio y análisis de la sequía tiene distintos enfoques desde su naturaleza del término, desde su inicio, duración, pronósticos de sequías y los impactos en los sectores económicos y en el ecosistema. En este sentido, existen diferentes tipos de sequía según las variables del ciclo hidrológico, precipitación (sequía meteorológica), humedad de suelo (sequía agrícola), agua subterránea y caudal (sequía hidrológica) (van Loon, 2015). La sequía hidrológica es determinada por la propagación de la sequía meteorológica a través de los procesos del ciclo hidrológico. De esta manera, la sequía hidrológica es influenciada por las propiedades del ciclo hidrológico (Peters et al., 2003). Asimismo, la propagación de la sequía meteorológica obedece a cambios en los niveles promedios de las variables climáticas y estas influyen en la sequía hidrológica en déficit de esorrentía, caudales y flujos subterráneos. Asimismo, existe un lapso de tiempo en la respuesta de los niveles y caudales de los ríos con las condiciones climáticas, y además es estacionalmente dependiente. Debido a los efectos relativos a diferentes fuentes de agua, condiciones climáticas, procesos hidrológicos y manejo del agua varían a lo largo del año hidrológico (Tallaksen L.M., 1995).

Según las estadísticas de la Organización Meteorológica Mundial (OMM), existen hasta 55 índices de sequía. Los más utilizados, es el índice de precipitación estandarizado (SPI, por sus siglas en inglés) y Índice de escurrentía estandarizado (SRI, por sus siglas en inglés), entre otros. El SPI fue propuesto para estudiar la sequía en Colorado, EE. UU. Debido a su cálculo simple, múltiples escalas de tiempo, mejor reflejo de la intensidad de la sequía y una mayor sensibilidad a los cambios de la sequía, SPI ha sido popularizado por la OMM y se aplica a nivel mundial, y puede evaluar bien la sequía meteorológica y puede reflejar intuitivamente el impacto de las precipitaciones sobre la sequía. El SRI fue propuesto por (Shukla & Wood, 2008), y su concepto se basó en el concepto de SPI. (Shao, 2014) concluyó que los resultados de la evaluación de sequías e inundaciones por SRI tuvieron una buena consistencia y cierta aplicabilidad en diferentes regiones climáticas, y podría muy bien evaluar la sequía hidrológica. Hasta el momento los índices de sequía se han convertido en un medio importante para evaluar las condiciones de sequía y condiciones húmedas y algunos han logrado resultados significativos con el fin de vigilancia y pronóstico de la sequía a distintas escalas espacial y de tiempo.

Una metodología adecuada para el análisis de la propagación de la sequía meteorológica (SM) en la sequía hidrológica (SH) es utilizando índices estandarizados para la meteorológica y la hidrológica con el fin de contrarrestar la correlación interna entre ellos puede ayudarnos a comprender mejor los procesos de propagación y los mecanismos de formación del ciclo del agua, y también pueden ayudar a formar teorías básicas más completas sobre el seguimiento de la sequía. Estudios relevantes han demostrado que la mayoría de las sequías hidrológicas tiene un retardo de tiempo de las sequías meteorológicas, pero este retardo es obviamente por las características de la heterogeneidad espacial y propia de las cuencas hidrográficas. Por otro lado, a escala mensual a la trimestral, el SRI es un complemento útil para entender la propagación del déficit de lluvia (SPI). Sin embargo, a la fecha los estudios relacionados se han centrado principalmente en sequía meteorológica con un solo índice, y algunos se han centrado en la sequía hidrológica, especialmente las relaciones entre la sequía hidrológica y la respuesta a la sequía meteorológica, lo que comprensión poco clara del proceso de propagación de la sequía meteorológica a la sequía hidrológica y sus factores de influencia.

Este estudio se centra en la interacción entre el cambio de uso de suelo y la propagación de la sequía, analizando cómo los cambios en la cobertura del suelo pueden exacerbar la propagación de la sequía meteorológica a hidrológica y como es la tendencia en los últimos 40 años.

Basado en esto, se planteó dos objetivos: (1) Analizar las características espaciales y temporales de la propagación de la sequía meteorológica a la sequía hidrológica en cuencas amazónicas en el Perú en los últimos 40 años. (2) Determinar los cambios de uso de suelo en la propagación de la sequía meteorológica e hidrológica. Los resultados de esta investigación mejorarán la predicción de la sequía hidrológica en base a la meteorológica y determinar los cambios del uso del suelo por el impacto de la sequía.

Área de estudio

El agua que drena desde el oriente peruano, generadas al lado oriental de la Cordillera de los Andes (Sierra oriental y Amazonía), a través de 44 cuencas hidrográficas, cuyos ríos dirigen sus aguas, ya fuera del territorio nacional, hacia el Océano Atlántico.

La superficie de esta vertiente representa el 74 % del territorio del Perú, y debido a las abundantes lluvias en la selva alta y baja, esta vertiente dispone de más del 97 % del volumen de agua del país (1998405 m³/año).

De los 2368 millones de m³ de agua que se consumen en esta vertiente, la mayoría es para fines de uso agrícola (84 %), poblacional (6,2 %) y minero (2,2 %) (ANA, 2022).

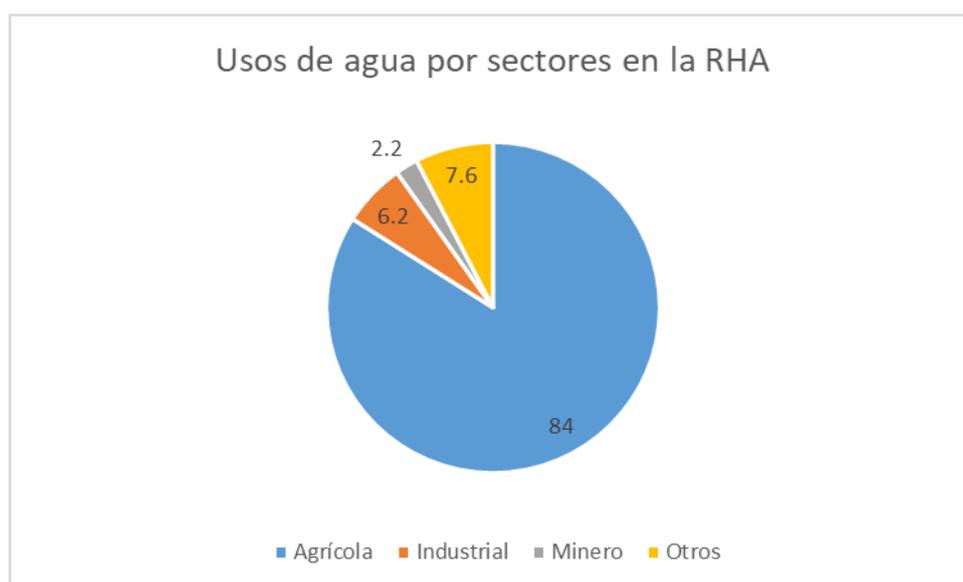


Figura 1. Usos del agua por sectores económicos

Climatología

La clasificación climática se basa en el Mapa de clasificación climática del Perú (SENAMHI, 1988), el cual ha sido elaborado considerando factores que condicionan de modo preponderante al clima, como la latitud, la Cordillera de los Andes, la Corriente Costera Peruana (de aguas frías), el Anticiclón del Pacífico Sur y la continentabilidad. La información base de esta clasificación se sustenta es datos meteorológicos de veinte años (1965-1984), a partir de la cual se formula los índices climáticos de

acuerdo con el sistema de clasificación de climas de Warren Thornthwaite. Para la descripción de los tipos de clima, ver Anexo (Tabla 1).

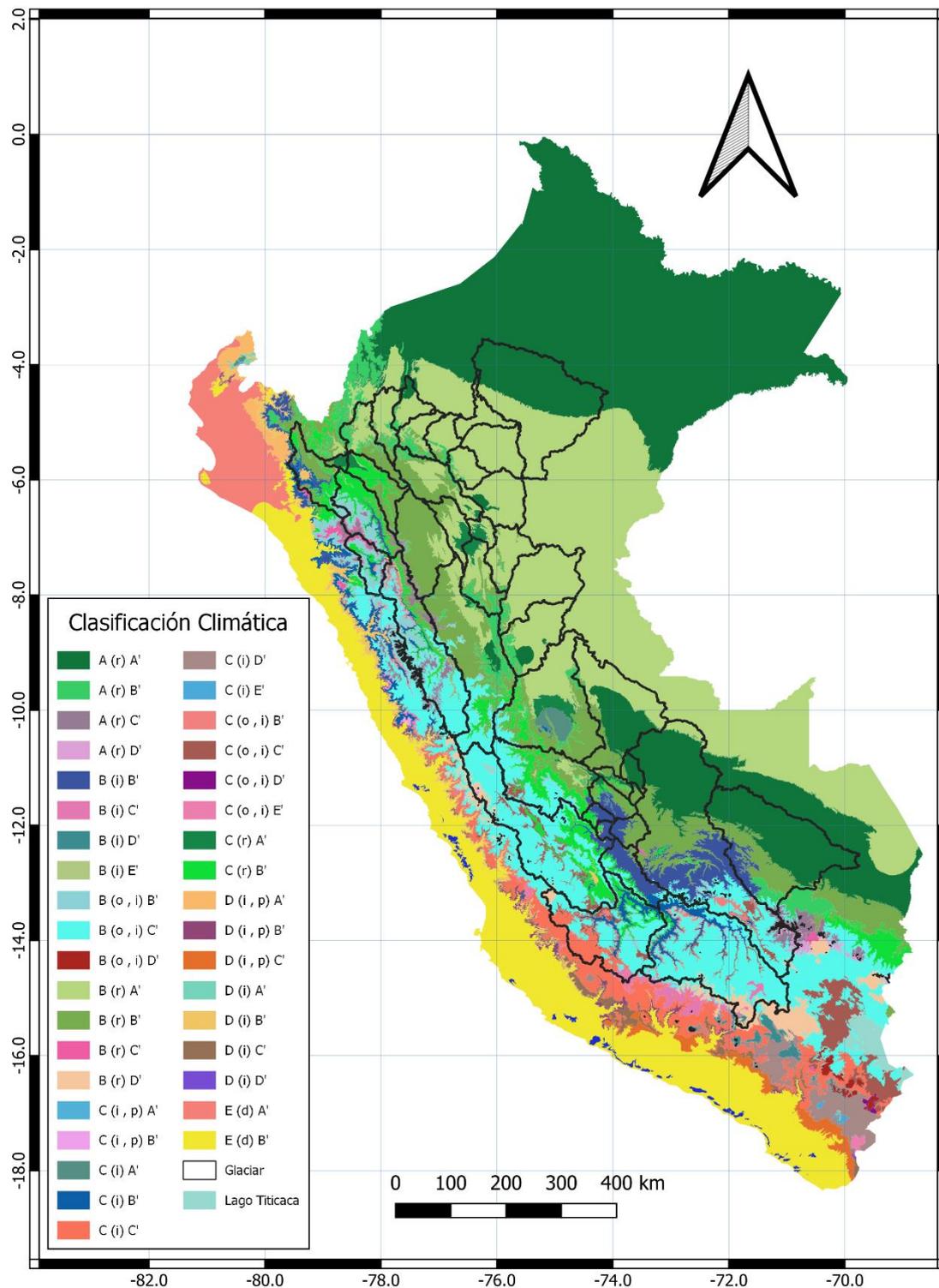


Figura 2. Mapa clasificación climática, SENAMHI (1981-2010), Digitalizado 2020.

Fuente: Elaboración propia

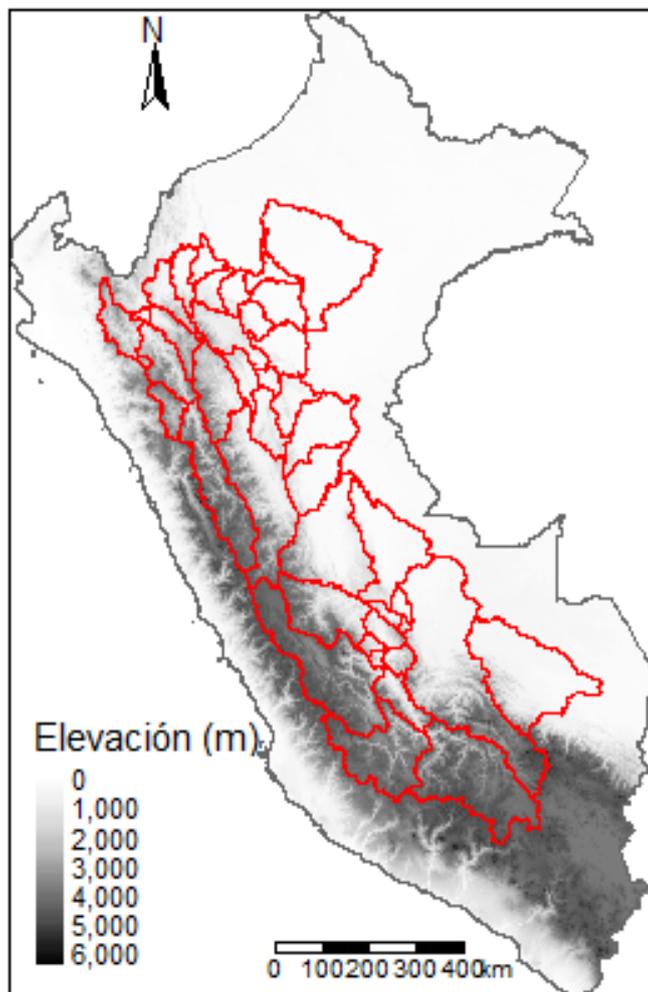


Figura 3. Área de estudio

2. DATOS Y MÉTODOS

2.1 Datos

2.1.1 Datos meteorológicos

Se obtuvo la precipitación mensual a partir del producto *Peruvian Interpolation of the SENAMHIs Climatological and Hydrological Stations* (PISCO) del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). Datos grillados de precipitación superficial de 1981–2020, resolución espacial de 0.1×0.1 Km. Regionalizados a escala de cuencas (Unidades hidrográficas). Cada cuenca en el promedio de precipitación ocupada por varias grillas, en total se seleccionaron 41 cuencas pertenecientes a la vertiente del Amazonas.

2.1.2 Datos de esorrentía

Los datos de esorrentía fueron seleccionados del producto PISCO_HyM_GR2Mv1.1 del SENAMHI, desde 1981-2020, estos datos se presentan por tramos de río. En total el Producto

presente 3159 tramos de río a nivel nacional se seleccionaron aquellos que pertenecen a las 41 cuencas. Así, el tramo de río seleccionado es resultante del drenaje de varios tributarios en la salida de la cuenca.

2.1.3 Datos de uso de suelo

Landsat

Imágenes de sensoramiento remoto proveniente de Landsat/TM de los estados unidos fue recolectado para 1985 de los tiles identificados cubren la zona de estudio (hh10vv09.h2v5; hh10vv09.h2v6; hh10vv09.h3v5; hh10vv09.h3v6; hh10vv09.h3v0). Correspondiente a los meses de enero a marzo, asimismo se utilizó las bandas de corrección de nubes. Para el procedimiento de composite, combinación de bandas de los índices de vegetación y contenido de agua en el suelo se utilizó los programas Qgis y lenguaje de programación R.

Modis

Los productos MODIS de tipo de cobertura de la tierra (MCD12Q1) proporcionan un conjunto de datos científicos (SDSs) de cobertura global con una resolución espacial de 500m x 500m y una resolución temporal anual con 6 esquemas de clasificación de tipo de cobertura de suelo. Se seleccionaron los Tiles de los tiles: h09v09, h10v09, h09v09, h10v10, h11v09, h11v09 en formato HDF pertenecientes al Perú.

2.2 Métodos

2.2.1 Índice de Precipitación Estandarizado (SPI) e Índice de Escorrentía Estandarizada (SRI)

Para el cálculo de los índices estandarizados de precipitación y escorrentía se utilizó el propuesto por McKee. Para ellos se hace uso de la función de distribución de probabilidad Gamma para describir los cambios de la precipitación en índices, llamado SPI (por sus siglas en inglés). Para conocer los pasos de cálculo específicos de SPI, consulte la literatura (McKee, 1993). SPI tiene múltiples escalas de tiempo, y estas escalas del SPI reflejan diferentes situaciones de sequía e inundaciones. SPI-3 puede identificar con precisión sequías e inundaciones meteorológicas a corto plazo y tiene una alta correlación con sequías agrícolas. SPI-12 es un indicador preciso de sequías e inundaciones a largo plazo y sus duraciones y generalmente está altamente correlacionado con ríos, embalses y niveles de agua subterránea (Ye et al. 2012, Wang et al, 2014).

Por lo tanto, se seleccionaron SPI-1, SPI-3 y SPI-12 para analizar las condiciones secas y húmedas mensual, estacional y anual. Kingtse (2008) consideró que el SRI se puede calcular del mismo modo que el SPI (Mo, 2008). Shao calculó el SRI utilizando el método de cálculo de SPI, demostró que el SRI calculado era correcto y podía ser utilizado en el estudio de la identificación de sequías e inundaciones y su proceso de evolución (Shao, 2014).

En este trabajo se utiliza el esquema de clasificación de trabajos previos como el de Junju (2019)

Tabla 1. Clasificación de índice de precipitación estandarizado (SPI) e índice de escorrentía estandarizada (SRI)

Rango de Índice	Nivel del SPI y SRI
(-1,0)	Sequía leve
(-1.5,-1]	Sequía moderada
(-2,-1.5]	Sequía severa
(-∞, -2]	Sequía extrema

2.2.2 Índice de intensidad de propagación de la sequía (DPI)

Con el fin de expresar cuantitativamente la propagación de la sequía meteorológica a la hidrológica, se utiliza el índice DPI definida por Junju (2019), sigue la siguiente fórmula,

$$DPI = \frac{HA}{MA} (MA \neq 0)$$

DPI es el índice de propagación de la sequía meteorológica a la hidrológica, HA es la intensidad de la sequía hidrológica sobre un periodo de tiempo, MA es la intensidad de sequía meteorológica sobre un periodo de tiempo. La intensidad de sequía se refiere al valor promedio del SPI o SRI en un año de sequía. La dirección de propagación es definida de la sequía meteorológica a la hidrológica. Cuando el DPI es mayor a 1, la sequía hidrológica es más grande que la sequía meteorológica, y la intensidad de propagación de la sequía meteorológica a la hidrológica es más fuerte. Cuando el DPI es menor a 1, la sequía hidrológica es menor que la sequía meteorológica, y la intensidad de propagación de la sequía meteorológica a la hidrológica es débil. Cuando el índice de intensidad de propagación es igual a 1, es de igual a igual la intensidad de propagación de la sequía meteorológica a la hidrológica.

Acorde a esta clasificación del SPI y SRI (**Tabla 2**) propuesta por Junju (2019) se clasifica el DPI como muestra la tabla 2.

Tabla 2. Clasificación del índice de intensidad de propagación de la sequía

Rango de índice	Nivel	Rango de índice	Nivel
		1	De igual a igual
(1,1.1]	Levemente fuerte	[0.9,1)	Levemente débil
(1.1,1.2]	Moderadamente fuerte	[0.8,0.9)	Moderadamente débil
(1.2,1.3]	Extra fuerte	[0.7,0.8)	Extra débil
(∞,1.3]	Extremadamente fuerte	[0,0.7)	Extremadamente débil

2.2.3 Coeficiente de correlación retardado

Se utilizó el método de análisis de correlación con retardo de tiempo para calcular el retardo de tiempo entre tipos de sequía meteorológica a la hidrológica. Este método es aplicado al análisis de correlación de una serie temporal discreta y finita. Considera el tiempo de retardo de la interacción. Entre diferentes elementos de series temporales; es decir, si existe un proceso de retardo de la reacción. El procedimiento para calcular el coeficiente de correlación de retardo de tiempo se puede encontrar en (He, 2015).

Asimismo, en la Figura 4. Se muestra el diagrama de flujo de trabajo

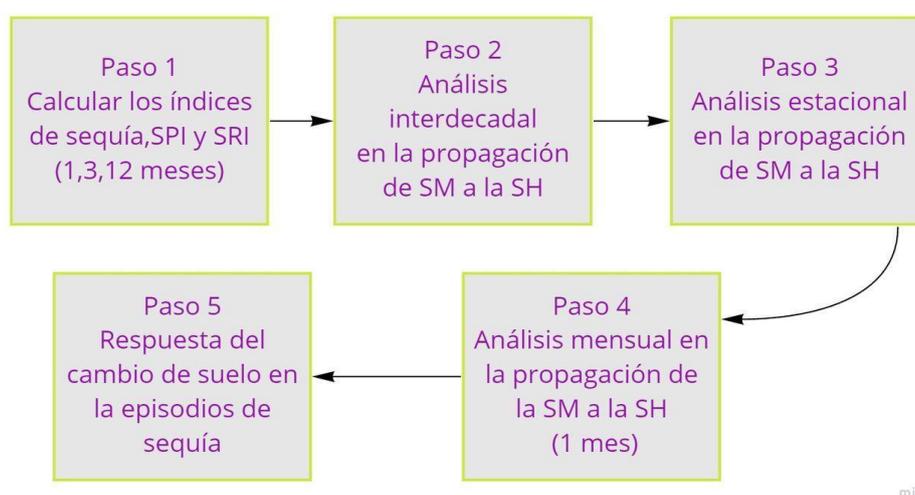


Figura 4. Flujo de trabajo

3. RESULTADOS

3.1 Respuesta interdecadal en la propagación de la sequía meteorológica a la hidrológica

Los valores de SPI-12 y SRI-12 en el período 1981 al 2020 fueron calculados a escala anual. Se analizaron las características estadísticas.

El valor del SPI-12 y el SRI-12 del mes de diciembre fue seleccionado debido a que el SPI y SRI a la escala 12 (12 meses) permite evaluar las condiciones secas en todo el año (**Figura 5a y 5b**). Además, las características de tendencia, asociación lineal, y la variabilidad de los 2 tipos de sequía meteorológica e hidrológica fueron evaluadas.

Para el SPI-12 se observó una tendencia positiva en la mayoría de las cuencas, el cual nos indica a lo largo de los últimos 40 años que la sequía meteorológica a largo plazo (12 meses) tiende a aumentar en magnitud. Por otro lado, en las cuencas Biabo, Inter Alto Madre de dios, Aguaytía, Intercuenca Alto Huallaga, Cushabataya, Intercuenca Bajo Marañón y Pachitea mostraron tendencia negativa. Por otro

lado, para la sequía hidrológica SRI-12 tendencia positiva y negativa, nos indica un aumento en magnitud no uniforme en la zona de estudio, esto puede ser debido a las características intrínsecas de las cuencas andinas analizadas o a la antropización de la población causando alteración sobre las cuencas y a su variabilidad hidrológica natural en los últimos 40 años.

Con respecto a la variabilidad temporal, representada por el coeficiente de variación (CV) de las series de SPI-12 y SRI-12 en el periodo analizado (**Figura 5c y 5d**) nos indicaría alta grado de variabilidad para el SRI-12 y menor grado de variabilidad con el SPI-12 a larga escala. El SPI-12 presentan valores mayores a cero alcanzando un CV=30, mientras el SRI-12 presentó un CV de -100 hasta 100 esto nos representaría mucha variabilidad espacial en la zona de análisis. Cabe resaltar que algunas cuencas fluctuaron de 0 a 50 CV. Este análisis permitió observar el grado de variabilidad que fluctúa en los dos tipos de sequía la meteorológica y la hidrológica.

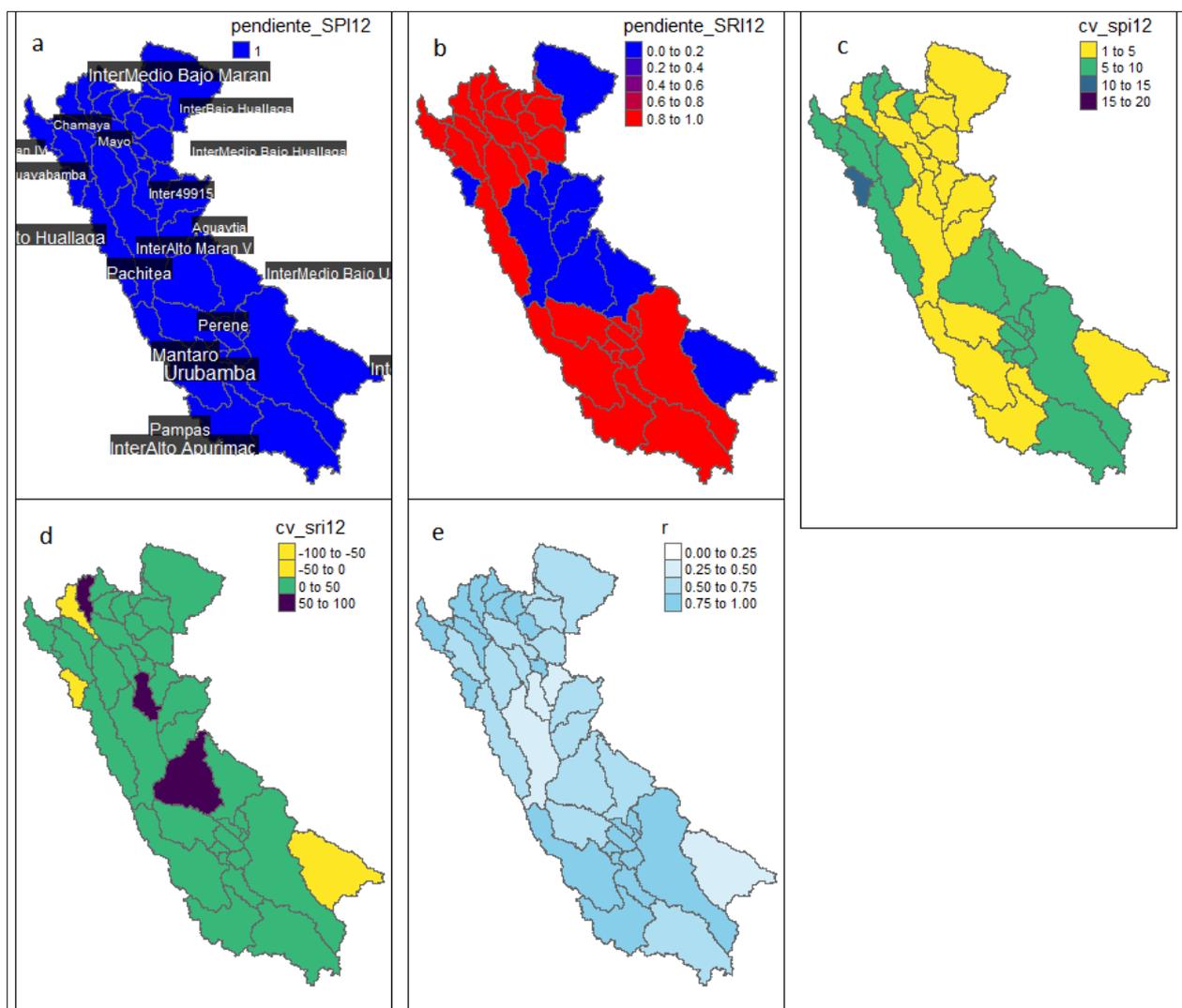


Figura 5. Características interdecadales en las cuencas amazónicas del Perú. a) y b) Pendiente de SPI-12 y SRI-12. c) y d) coeficiente de variación de SPI-12 y SRI-12 e) correlación lineal entre SPI-12 y SRI-12.

Finalmente, el análisis de correlación nos indica el grado de asociación lineal entre el SPI-12 y SRI-12 por medio del coeficiente de correlación de *Pearson*. r mayor a 0.5 con significancia al $\alpha=0.05$ nos indica alto grado de correlación a excepción de las cuencas Biabo, InterAlto Madre de dios, InterAlto Huallaga y Cushabataya que tiene una correlación menor a 0.5. Espacialmente esta asociación lineal entre los 2 tipos de sequía no es homogénea en la zona de estudio.

3.2 Respuesta estacional en la propagación de la sequía meteorológica a la hidrológica

Los valores del SPI-3 y SRI-3 fueron calculados a escala estacional para cuencas amazónicas en el periodo 1981-2020.

El análisis de CV y correlación lineal para el SPI-3 y SRI-3 para DEF (diciembre, enero y febrero), MAM (marzo, abril y mayo), JJA (junio, julio y agosto) y SON (setiembre, octubre y noviembre) representadas por las **Figura 6 y 7** nos indica: Baja variabilidad en el SPI-3 y alta variabilidad en SRI-3 para DEF y MAM a escala espacial en las cuencas amazónicas. Con respecto a la correlación lineal en la mayoría de las cuencas se obtuvo un r mayor a 0.5 con un $\alpha=0.05$ para DEF y MAM.

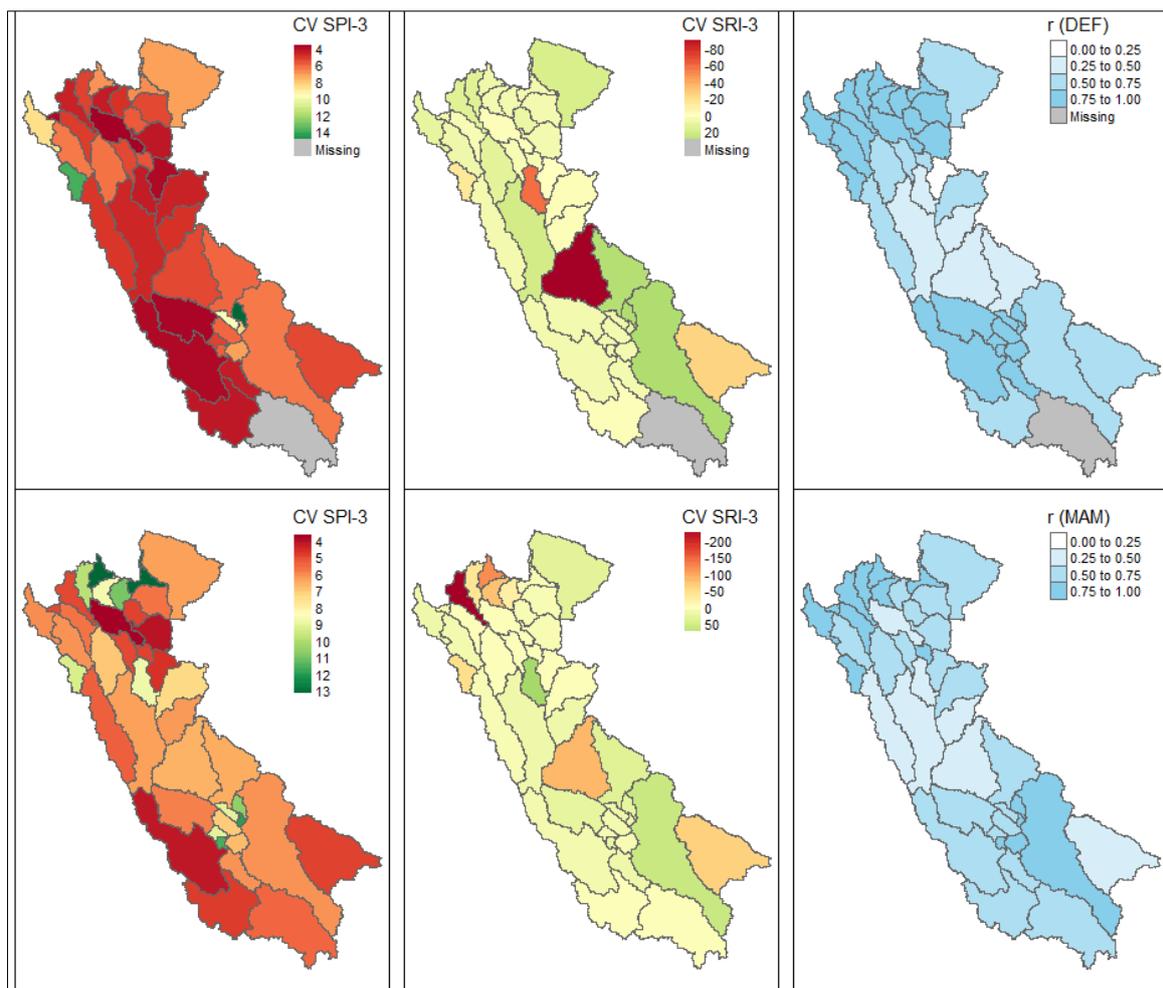


Figura 6. Característica estacional de variabilidad (CV) y asociación lineal (r) entre el SPI-3 y SRI-3 en cuencas amazónicas para DEF (diciembre, enero y febrero) y MAM (marzo, abril y mayo).

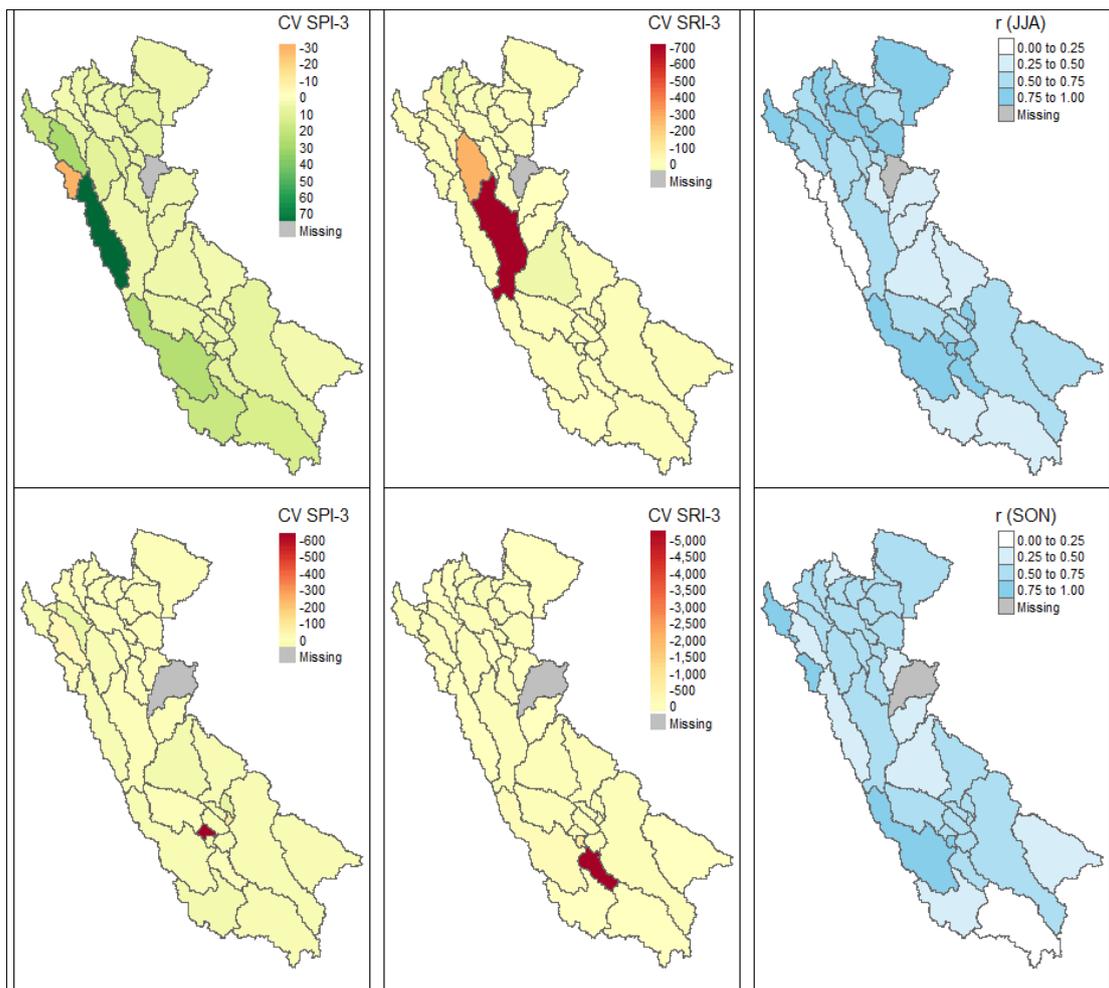


Figura 7. Característica estacional de variabilidad (CV) y asociación lineal (r) entre el SPI-3 y SRI-3 en cuencas amazónicas para JJA (junio, julio y agosto) y SON (setiembre, octubre y noviembre).

De la misma forma, para JJA y SON se tiene alta variabilidad para el SPI-3 y SRI-3, con respecto al coeficiente de correlación r también tiene valores mayores a 0.5 con $\alpha=0.05$ de significancia en la mayoría de las cuencas analizadas.

Cabe resaltar, para estas condiciones estacionales de invierno tienen caudales promedios mensuales bajos y en cambio para la estación SON el régimen de los caudales en el cual comienza en el año hidrológico con valores muy pequeños va incrementando mes a mes en la zona de estudio.

Para un análisis decadal espacial, se determinó el Índice de intensidad de propagación de sequía (DPI) utilizando el SPI-3 y SRI-3 en las 41 cuencas amazónicas, asimismo, se hizo un análisis decadal (**Figura 8**).

Para DEF mostró que 80s y 90s el 37.5 % y 50 % de las 41 cuencas mostraron un DPI de levemente fuerte a extremadamente fuerte, 20s y 21s el 62.5 % y 68.1 % mostraron un DPI de levemente a extremadamente fuerte. No obstante, en las 2 últimas décadas se ha considerado sólo el 60 % de cuencas de las 41, debido a los valores nulos presentados la intensidad promedio de sequía para DEF y por ende valores del DPI nulos. Esto nos indica la fuerte relación de propagación entre la sequía

meteorológica a la hidrológica en los 80s y 90s coincidiendo con la mayor frecuencia de sequías meteorológica e hidrológicas presentadas en estas décadas.

En el caso de MAM, para los 80s y 90s se obtuvo el 47.3 % y 43.2 % de las 41 cuencas con categoría levemente a extremadamente fuerte de DPI. Para los 20s se obtuvo 58.9 % de cuencas (de un total de 38 cuencas) con DPI mayores a 1 levemente a extremadamente fuerte. Por otro lado, para los 21s en la mayoría de las cuencas no se tiene suficiente información del DPI debido a que en la mayoría de las cuencas amazónicas para esta estación de año, se tiene una intensidad promedio nula de sequía meteorológica e hidrológica.

Para JJA se observó en los 80s y 90s un 43.6 % y 35.9 % respectivamente de cuencas con levemente a extremadamente DPI fuerte. Para los 90s el 65.4 % de las cuencas (considerando 39 cuencas) con categoría de levemente a extremadamente fuerte (DPI mayor a 1). Para los 21s no se tiene valores de DPI (intensidad promedio nulo). Cabe resaltar, que si bien se tiene un índice de propagación de la sequía meteorológica a la hidrológica **fuerte** no necesariamente se estaría hablando de una sequía y/o déficit debido a que estos meses del año son de estiaje con valores de escorrentía casi ceros o bajos.

Finalmente, para SON 80s y 90s se tiene un 26.3 % y 47.4 % respectivamente de cuencas con categoría de DPI levemente a extremadamente fuerte. En los 20s y 21s se tiene el 60.5 % (de un total de 31 cuencas) y 80 % (de un total de 25 cuencas). Si bien, en las últimas décadas hay DPI fuerte, cabe precisar que en esta temporada recién se está iniciando el año hidrológico y la temporada de lluvias, asimismo en esta estación del año se ha considerado un menor número de cuencas (25 cuencas) debido a que en las otras tiene una intensidad promedio nula de sequía meteorológica e hidrológica.

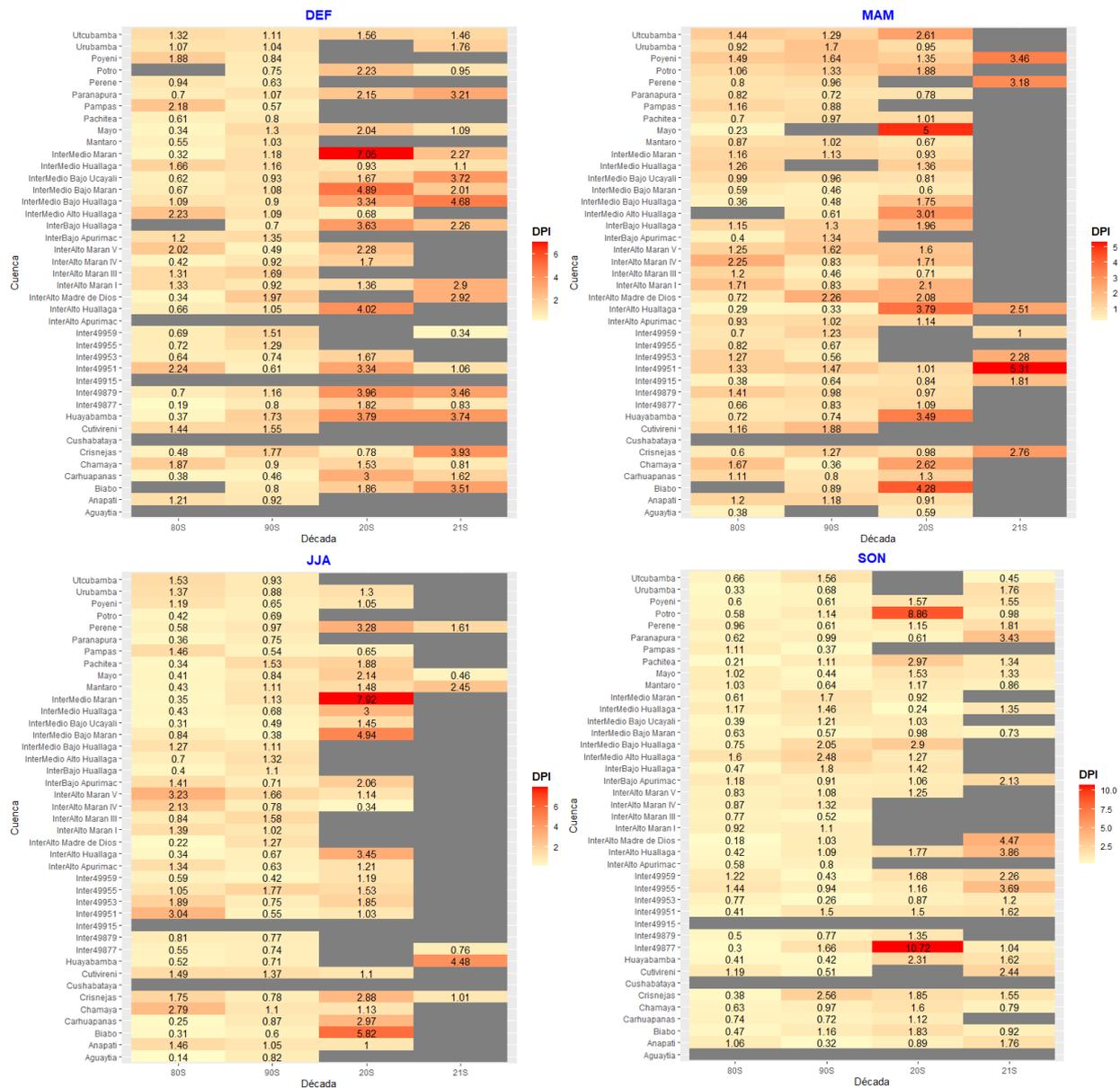


Figura 8. Variaciones estacionales del DPI en 41 cuencas amazónicas para cada década.

3.3 Respuesta mensual en la propagación de la sequía meteorológica a la hidrológica

Acorde a la **Figura 9**, se calculó índices estandarizados de precipitación y escorrentía para cada tipo de sequía meteorológica e hidrológica SPI-1 y SRI-1 a escala mensual.

Conforme al análisis de correlación con retardo en el tiempo con lags de $k=0$, $k=1$, $k=3$, $k=4$, $k=5$ y $k=6$ meses para el SPI-1 principalmente de los cuales, se encontró para $k=0$ y $k=1$ tiene mayor correlación positiva y significativa con un coeficiente $r > 0.4$ en la mayoría de cuencas amazónicas. Este resultado, nos indica que sin ningún retraso los dos tipos de sequía tanto meteorológica y la hidrológica tienen una relación lineal significativa en las cuencas analizadas y suceden en simultáneo.

Para un análisis estacional del SPI-1 y SRI-1 se calculó la correlación lineal de ambos índices para $k=0$ y se procedió a realizar un "Boxplot" el cual, muestra la dinámica de propagación en las distintas estaciones del año para las 41 cuencas. De este análisis se observó que DEF y MAM en conjunto se tiene mayor correlación y menor correlación en SON. Algunos valores atípicos de correlaciones muy bajas ($r < 0.5$) en DEF, JJA y SON (Ver **Figura 10**).

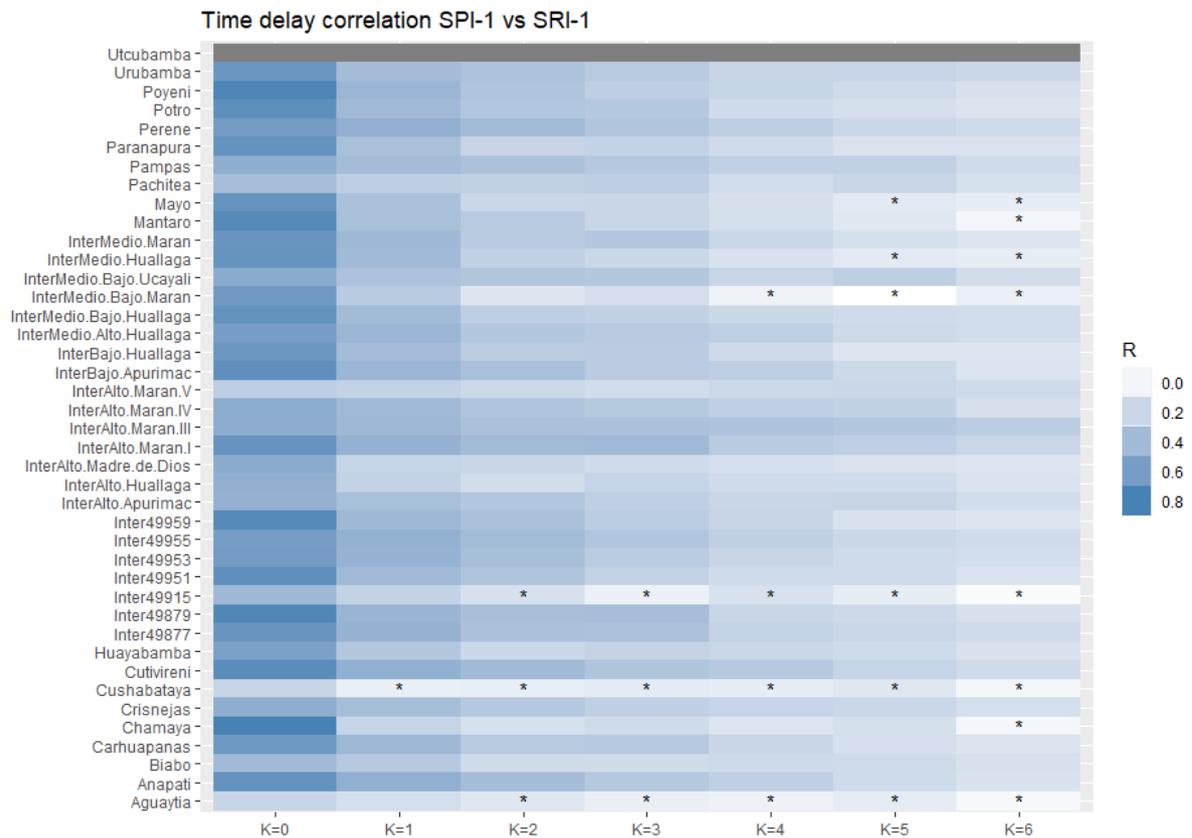


Figura 9. Time delay correlation entre el SPI-1 y SRI-1 en las cuencas andinas

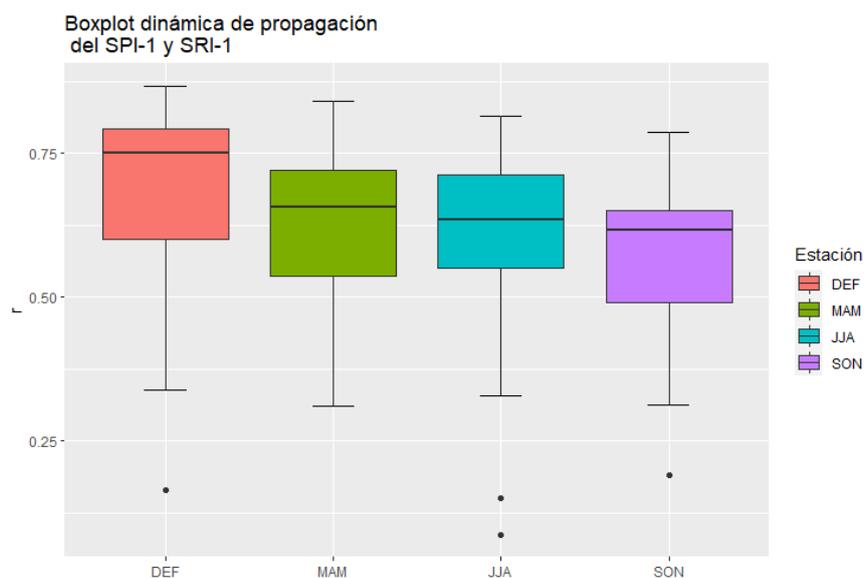


Figura 10. Boxplot de la dinámica de propagación de la sequía meteorológica a la hidrológica sin retraso ($k=0$) para cada estación del año.

3.4 Impacto del cambio climático en la propagación de la sequía meteorológica a la hidrológica

El cambio climático potencialmente impacta en el ciclo hidrológico y en los recursos hídricos (Fatichi et al., 2011). En este sentido, el balance hídrico entre la precipitación y evapotranspiración directamente es afectada por estos desequilibrios del ciclo hidrológico, la cual afecta a la propagación de la sequía meteorológica a la hidrológica. Así, la **Figura 11**, en líneas generales nos indica una tendencia creciente o positiva de la precipitación (+9.62) y una tendencia decreciente o negativa para la evapotranspiración potencial (-0.10), esto nos indicaría que en los últimos años hay mayor intensidad de precipitación y menor intensidad de evapotranspiración, esto puede deberse a la pérdida de biodiversidad y degradación del suelo y otros factores externos al uso de suelo y cambio climático.

Así, en los 90s la precipitación en las cuencas amazónicas tiene un crecimiento o “salto” significativo en magnitud. Específicamente, en 1992 se observa una disminución de la precipitación anual y la evapotranspiración, esto podría deberse a la pérdida de energía en forma de calor del suelo en general en el área de estudio debido a la sequía suscitada en ese año. Cabe resaltar que se presentó un episodio niño 1991-1992.

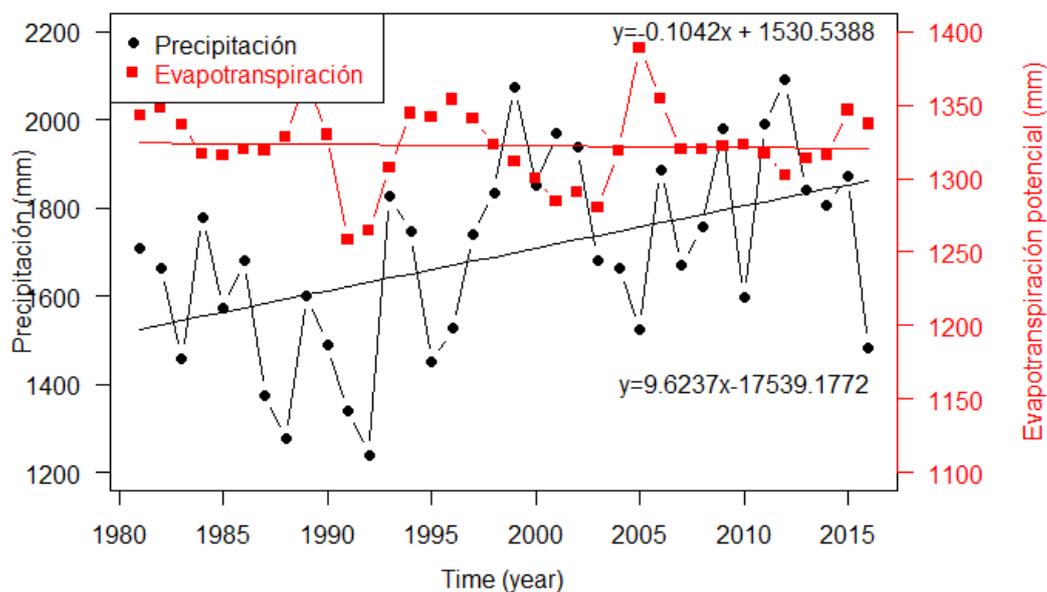


Figura 11. Tendencia en la precipitación anual y en la evapotranspiración en cuencas amazónicas.

3.5 Impacto del uso del suelo en la propagación de la sequía meteorológica a la hidrológica: caso Inter cuenca Alto Huallaga

A partir de la evaluación de usos de suelo de imágenes de satélite en 1985 y 2019 para la cuenca Alto Huallaga para tipos de suelo; Bosque, tierra de cultivo/desarrollado y suelo desnudo se identificó los cambios de uso de suelo en la propagación de la sequía meteorológica a la hidrológica.

El uso de suelo y la estructura espacial de los efectos de la propagación de los dos tipos de sequía es influenciado principalmente por la escorrentía y la confluencia de los procesos físicos en la cuenca. Así, las tierras de cultivo y desarrollado en 1985 comprendían el 35.7 % de la cuenca y en el 2019 comprendió el 49.4 % obteniendo una proporción de 13.6 % de expansión territorial en la cuenca. Con respecto al DPI en los 80s fue de categoría extremadamente fuerte, mientras en 2019 (21s) fue de propagación débil. Este resultado nos indicaría baja propagación de la sequía meteorológica a la hidrológica, debido a la tendencia positiva en precipitación en las últimas décadas (Figura 12). Así este cambio, se debe al incremento espacial de tierras de cultivo, desarrollo en infraestructura y actividades productivas, entre otros.

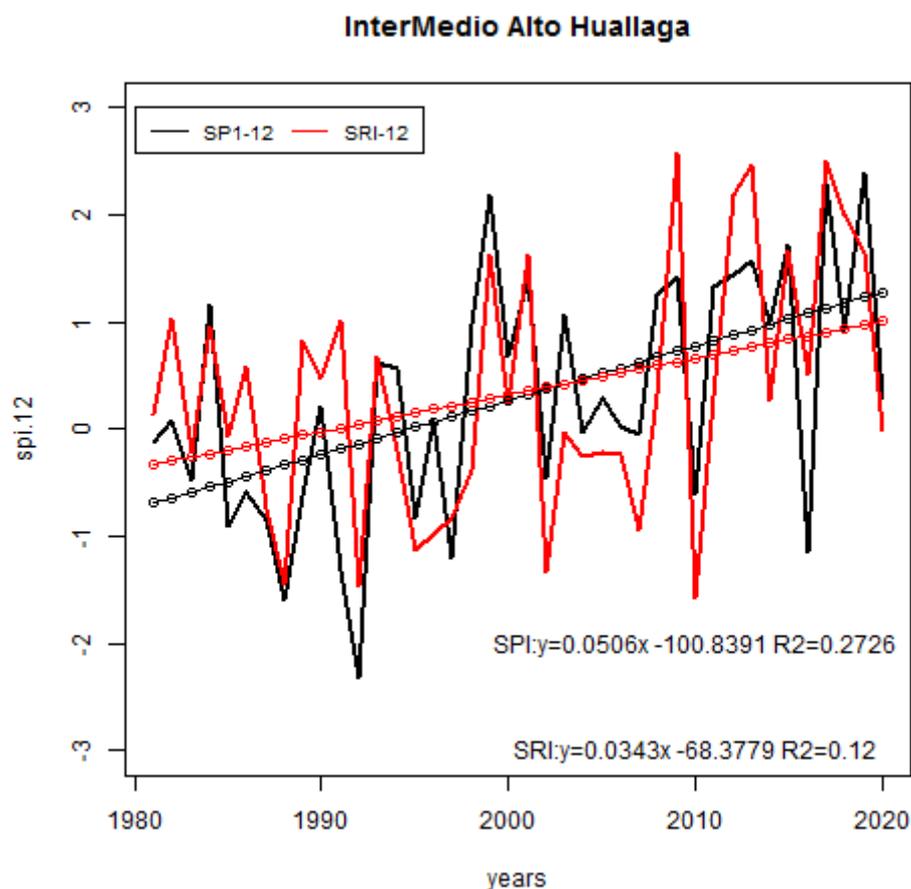


Figura 12. Evolución temporal de índices SPI-12 y SRI-12 en la Cuenca alto Huallaga.

4. CONCLUSIONES

Se determinó las características espaciales y temporales de la propagación de la sequía meteorológica a la sequía hidrológica en cuencas amazónicas (41 cuencas) en el Perú en los últimos 40 años. Los resultados mostraron que:

- En cuanto al análisis interdecadal, los resultados mostraron una tendencia positiva en la sequía meteorológica en los últimos 40 años, esta tendencia positiva se debe al aumento de magnitud de la precipitación en todas las cuencas analizadas. Por otro lado, en la relación lineal entre la sequía meteorológica e hidrológica a escala de 12 meses tiene correlaciones bajas menores a 0.5 al 0.05 de significación. En cuanto a la variabilidad medido por el coeficiente de variación el SPI-12 tiene menor variabilidad y el SRI-12 tiene alta variabilidad en todo el período analizado.
- Para el análisis trimestral, el SPI-3 y el SRI-3 de las estaciones DEF, MAM, JJA y SON, el coeficiente de variación C_v nos indica baja variabilidad para la sequía meteorológica y alta para la hidrológica. En cuanto a la relación lineal entre los dos tipos de sequía es mayor a $r = 0.5$ con un p-value de 0.05 de significación. Así, la sequía hidrológica se registró con menor intensidad en las décadas 80s a los 20s y las sequías son más frecuentes en las 2 últimas décadas. En este sentido, una fuerte propagación de la sequía meteorológica a la hidrológica en las primeras dos décadas sobre todo en la estación de verano de diciembre a febrero en términos estacionales evidencio valores de DPI mayores a 1.
- A la escala mensual, según el SPI-1 y el SRI-1 las mayores correlaciones positivas y significativas se tiene con un lag=0, esto indica que si sucede una sequía meteorológica podría suceder en simultáneo un hidrológica en las cuencas amazónicas analizadas.
- El análisis del uso de suelo ha permitido determinar la proporción el impacto del cambio climático en la propagación de la sequía meteorológica a la hidrológica en cuencas amazónicas. Específicamente, en la cuenca Alto Huallaga con 13 % de aumento de tierras de cultivo y suelo desarrollado.

5. REFERENCIAS

- Akinyemi, F. O. (2021). Vegetation trends, drought severity and land use-land cover change during the growing season in semi-arid contexts. *Remote Sensing*, 13(5), 1–20. <https://doi.org/10.3390/rs13050836>
- Barker, L. J., Hannaford, J., Chiveron, A., & Svensson, C. (2016). From meteorological to hydrological drought using standardised indicators. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(6), 2483–2505. <https://doi.org/10.5194/hess-20-2483-2016>

- He, F.L.; Hu, C.H.; Wang, J.J.; Wang, Y.L. Analysis of meteorological and hydrological drought in the Yellow River Basin during the past 50 years based on SPI and SDI. *Geogr. Geo-Inf. Sci.* 2015, 31, 69–75.
- Fatichi, S., Ivanov, V. Y., & Caporali, E. (2011). Simulation of future climate scenarios with a weather generator. *Advances in Water Resources*, 34(4), 448–467. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2010.12.013>
- Peters, E., Torfs, P. J. J. F., van Lanen, H. A. J., & Bier, G. (2003). Propagation of drought through groundwater - A new approach using linear reservoir theory. *Hydrological Processes*, 17(15), 3023–3040. <https://doi.org/10.1002/hyp.1274>
- Shao, J.; L. Y.; S. S. B. (2014). New computing method for standardized runoff index and its application. *Natural Disasters*, 23, 79–87.
- Shukla, S., & Wood, A. W. (2008). Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought. *Geophysical Research Letters*, 35(2). <https://doi.org/10.1029/2007GL032487>
- Tallaksen L.M. (1995). A review of baseflow recession analysis. *Journal of Hydrology*, 165(1–4), 349–370.
- UNITED NATIONS OFFICE FOR DISASTER RISK REDUCTION. (2021). *GLOBAL ASSESSMENT REPORT ON DISASTER RISK REDUCTION 2021 : special report on drought*. UNITED NATIONS.
- Van Loon, A. F. (2015). Hydrological drought explained. *WIREs Water*, 2(4), 359–392. <https://doi.org/10.1002/wat2.1085>
- Wilhite, D. A., Hayes, M. J., Knutson, C., & Helm, K. (n.d.). PLANMING FOR DROUGH1' MOVING FROM CRISIS TO RISK MANAGEMENT'. In *JOURNAL OF THE AMERICAN WATER RESOURCES ASSOCIATION* (Vol. 36).
- Zhou, J., Li, Q., Wang, L., Lei, L., Huang, M., Xiang, J., Feng, W., Zhao, Y., Xue, D., Liu, C., Wei, W., & Zhu, G. (2019). Impact of climate change and land-use on the propagation from meteorological drought to hydrological drought in the eastern Qilian Mountains. *Water (Switzerland)*, 11(8). <https://doi.org/10.3390/w11081602>

ANEXOS
Tabla A.1. Clasificación Climática Por El Método De Thornthwaite

Indicador	Clase	Climas
A	Muy Lluvioso	Precipitación Efectiva
B	Lluvioso	
C	Semiseco	
D	Semiárido	
E	Árido	
A'	Cálido	Eficiencia de temperatura
B'1	Semicálido	
B'2	Templado	
B'3	Semifrío	
C'	Frío	
D'	Semifrígido	
E'	Frígido	
F'	Polar	
r	Precipitación abundante en todas las estaciones	Distribución de la precipitación en el año
i	Invierno seco	
p	Primavera seca	
v	Verano seco	
o	Otoño seco	
d	Deficiencia de lluvias es todas las estaciones	
H1	Muy seco	Humedad atmosférica
H2	Seco	
H3	Húmedo	
H4	Muy húmedo	

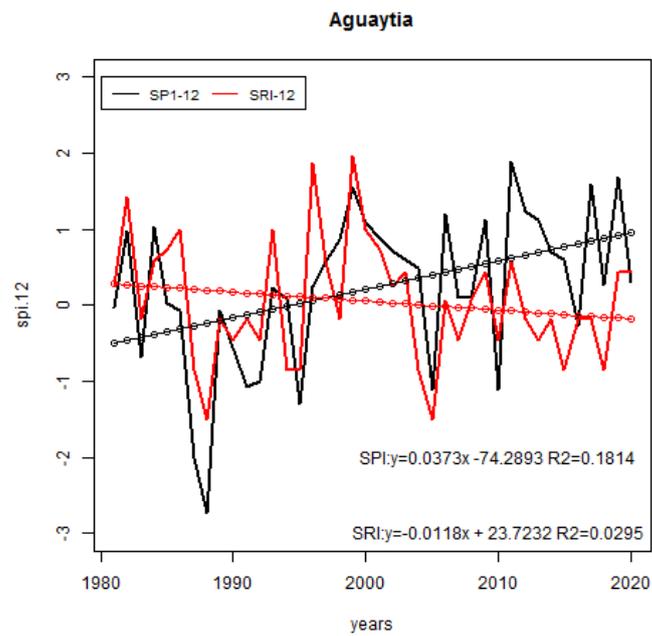


Figura A.1. Evolución temporal de índices SPI-12 y SRI-12 en la Cuenca Aguaytía.

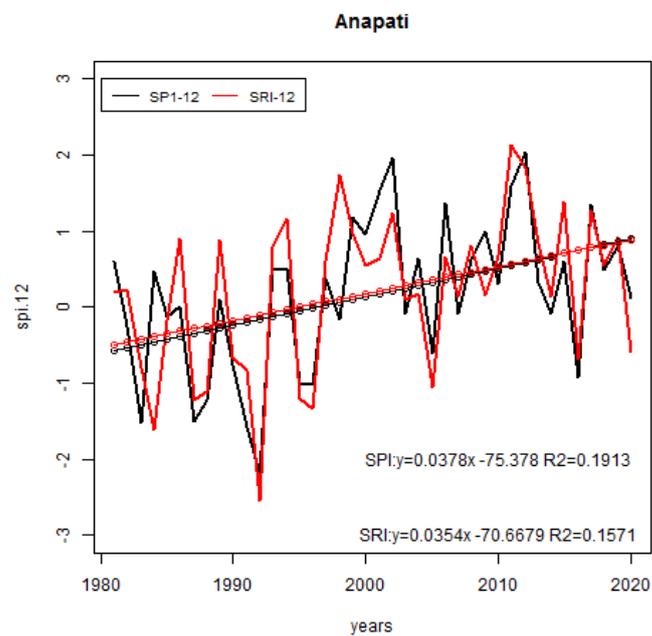


Figura A.2. Evolución temporal de índices SPI-12 y SRI-12 en la Cuenca Anapati.

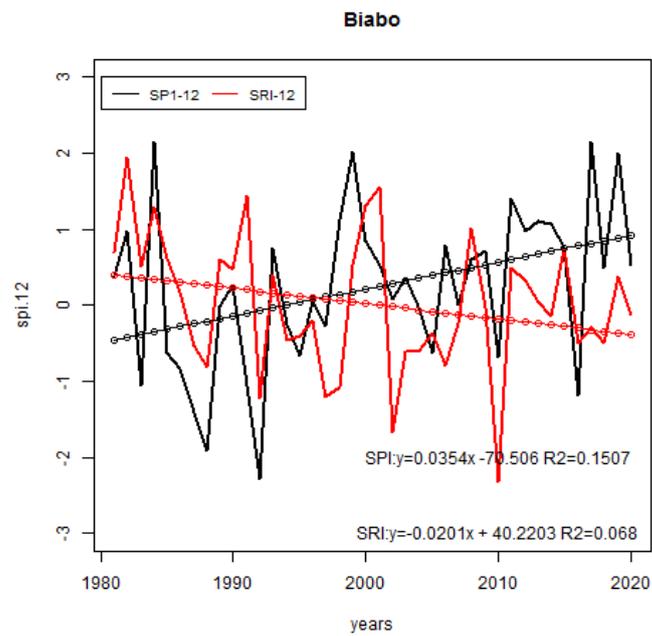


Figura A.3. Evolución temporal de índices SPI-12 y SRI-12 en la Cuenca Biabo.

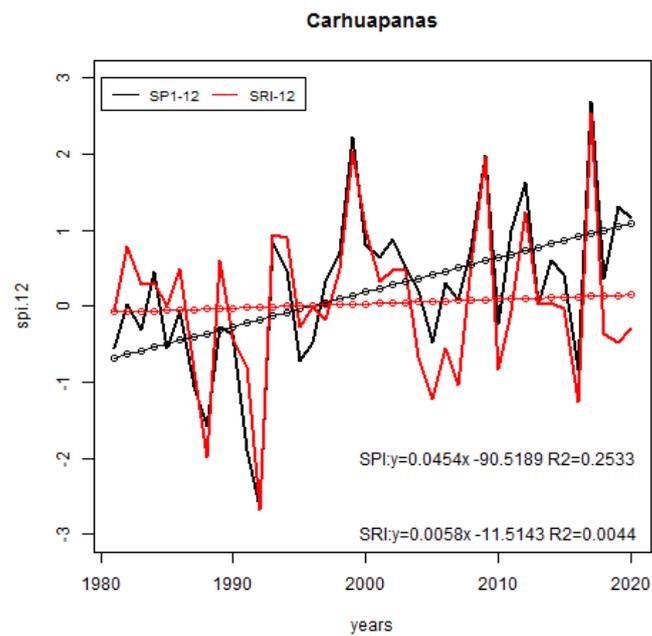


Figura A.4. Evolución temporal de índices SPI-12 y SRI-12 en la Cuenca Carhuapanas.

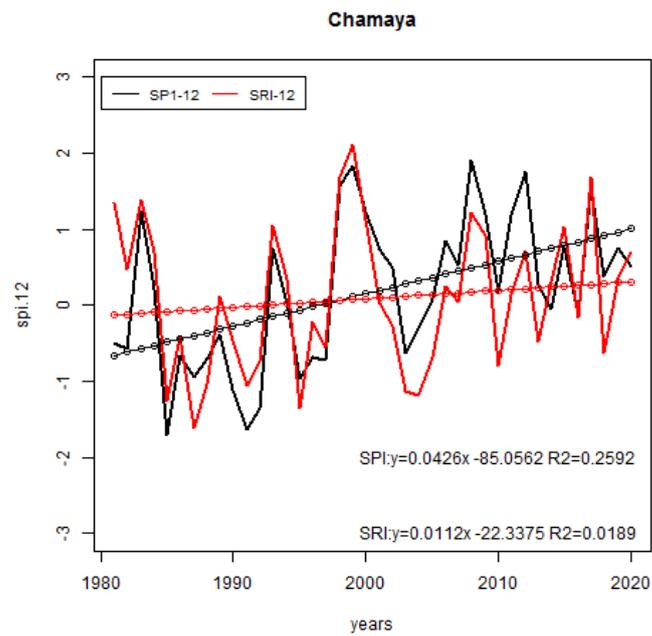


Figura A.5. Evolución temporal de índices SPI-12 y SRI-12 en la Cuenca Chamaya.

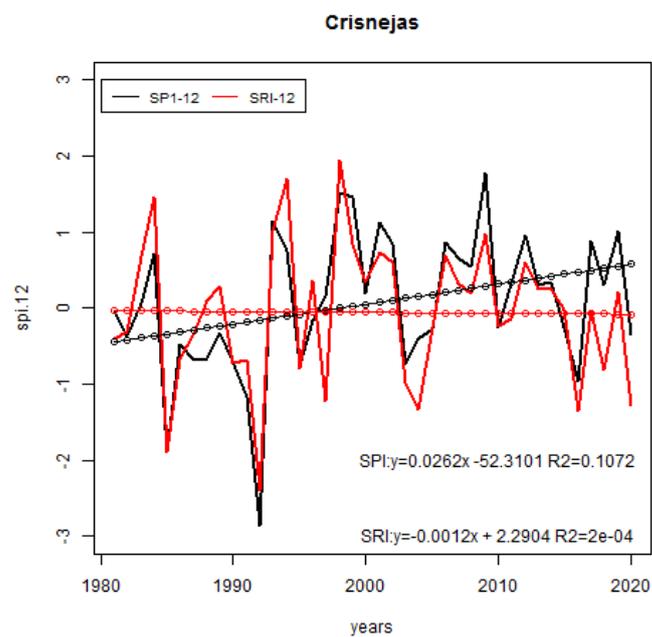


Figura A.6. Evolución temporal de índices SPI-12 y SRI-12 en la Cuenca Crisnejas.

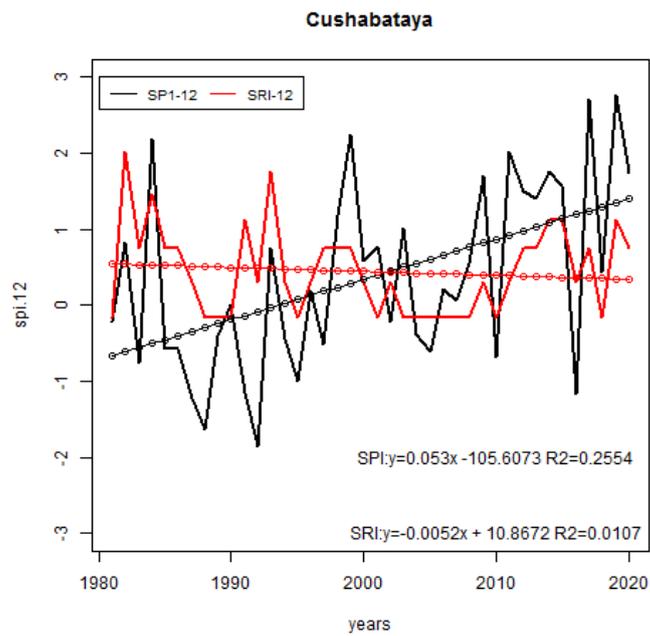


Figura A.7. Evolución temporal de índices SPI-12 y SRI-12 en la Cuenca Cushabataya

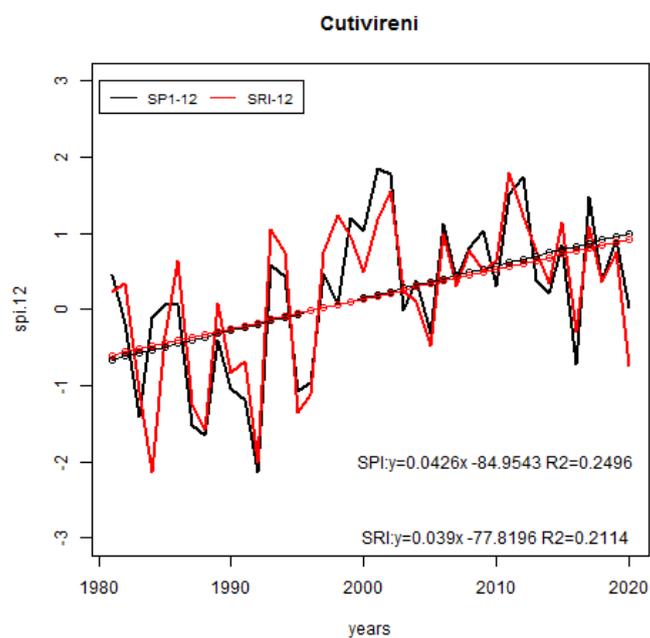


Figura A.8. Evolución temporal de índices SPI-12 y SRI-12 en la Cuenca Cutivireni

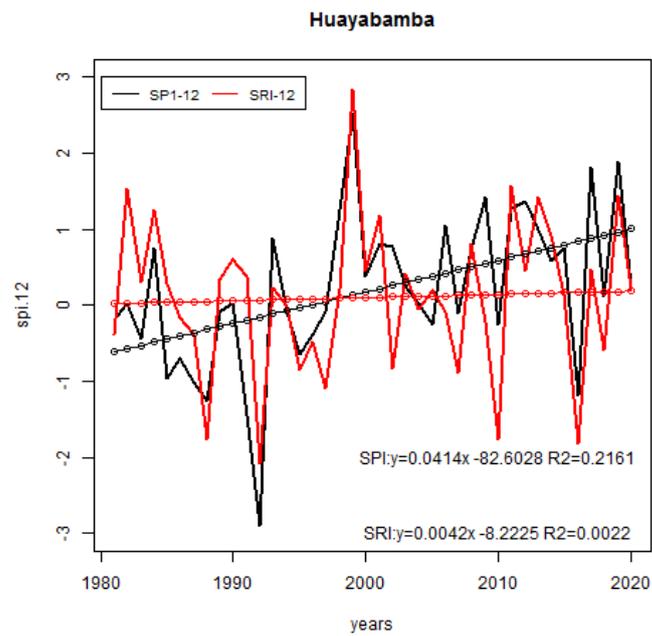


Figura A.9. Evolución temporal de índices SPI-12 y SRI-12 en la Cuenca Huayabamba.

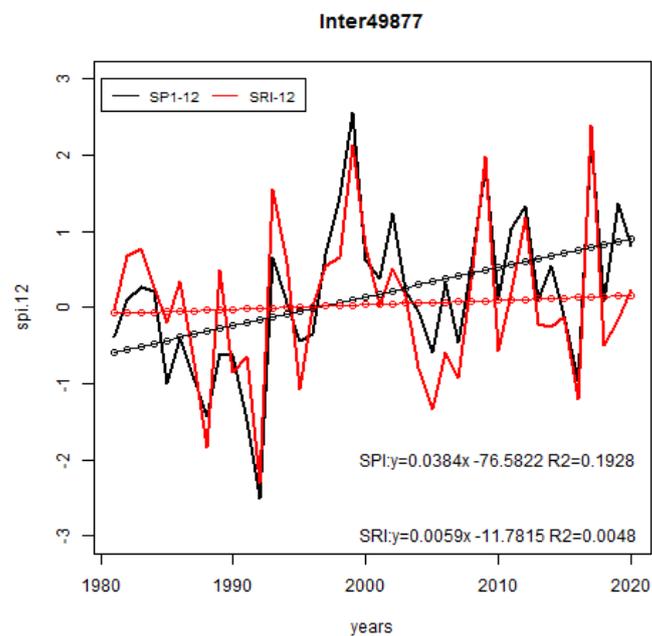


Figura A.10. Evolución temporal de índices SPI-12 y SRI-12 en la Cuenca Inter49877.

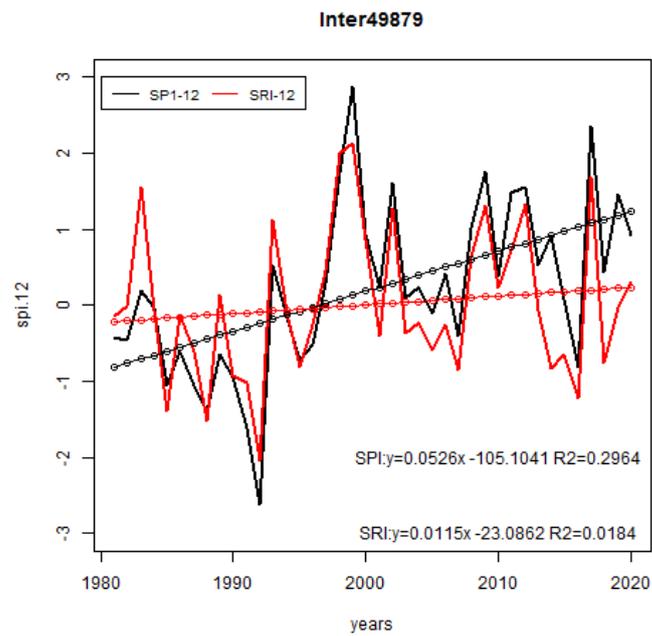


Figura A.11. Evolución temporal de índices SPI-12 y SRI-12 en la Cuenca Inter49879.

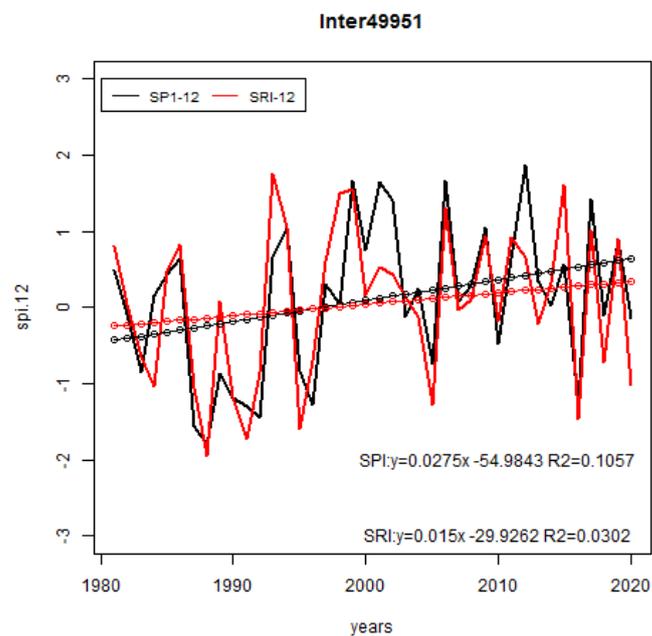


Figura A.12. Evolución temporal de índices SPI-12 y SRI-12 en la Cuenca Inter49951.

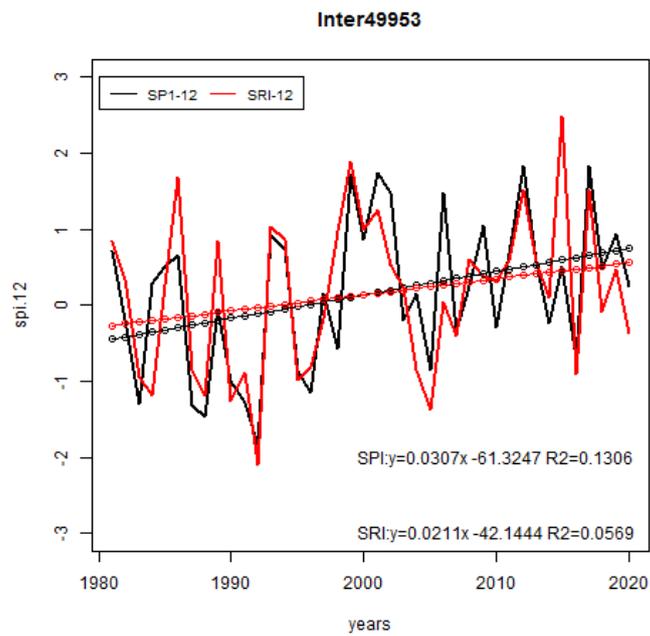


Figura A.13. Evolución temporal de índices SPI-12 y SRI-12 en la Cuenca Inter49953.

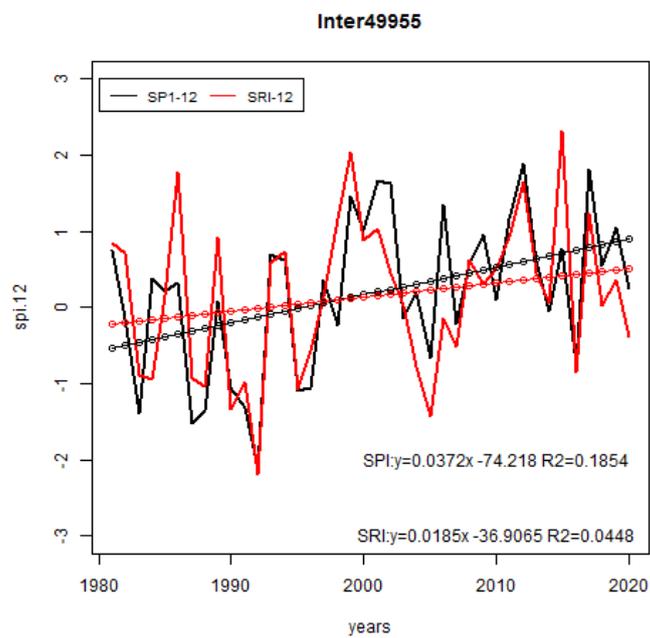


Figura A.14. Evolución temporal de índices SPI-12 y SRI-12 en la Cuenca Inter49955.

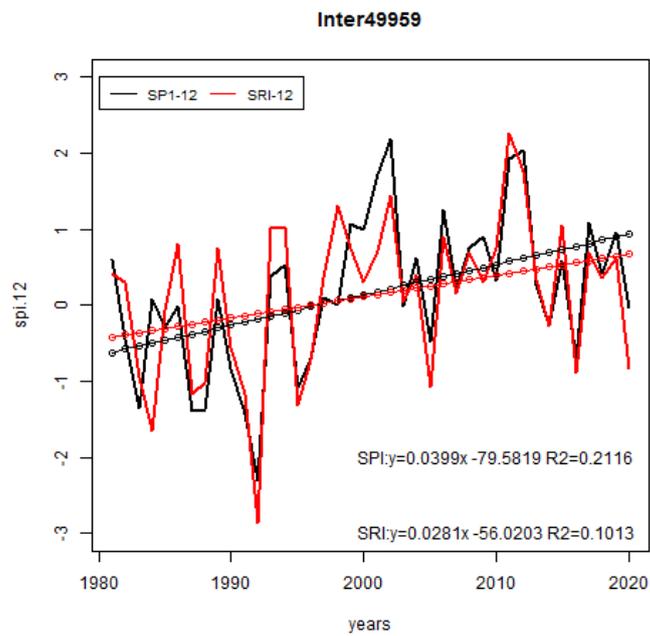


Figura A.15. Evolución temporal de índices SPI-12 y SRI-12 en la Cuenca Inter49969.

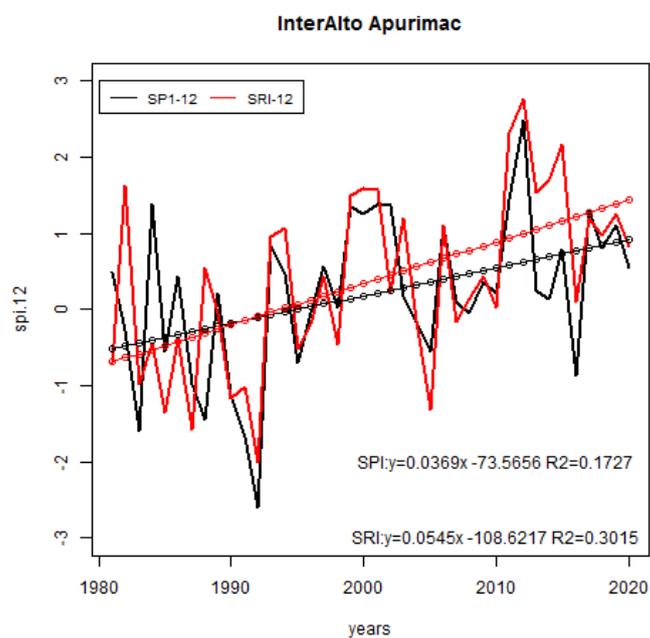


Figura A.16. Evolución temporal de índices SPI-12 y SRI-12 en la Cuenca Apurímac.

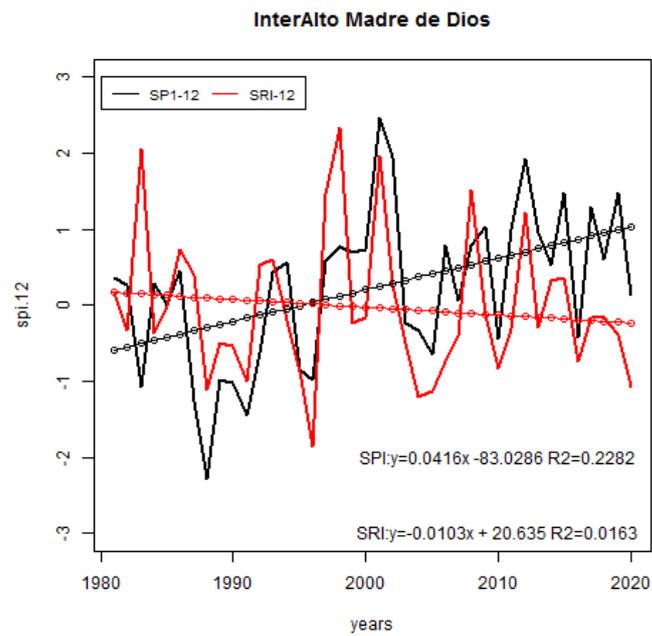


Figura A.17. Evolución temporal de índices SPI-12 y SRI-12 en la Cuenca InterAlto Madre de Dios.

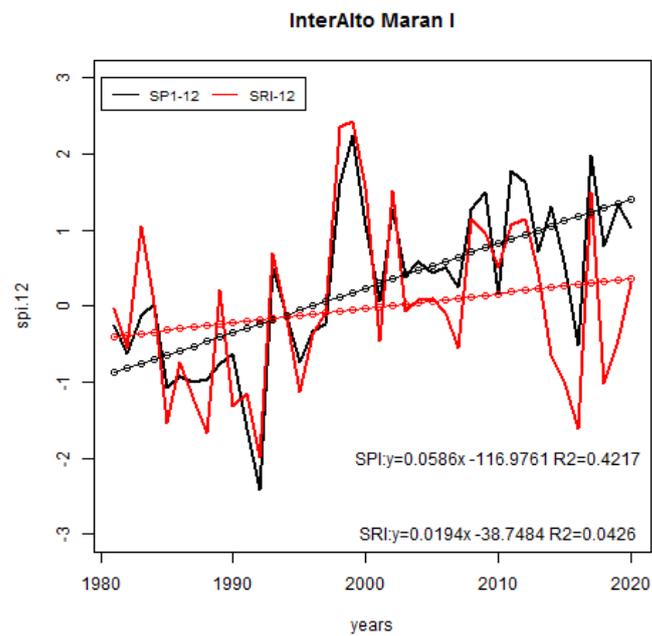


Figura A.18. Evolución temporal de índices SPI-12 y SRI-12 en la Cuenca Marañón I.

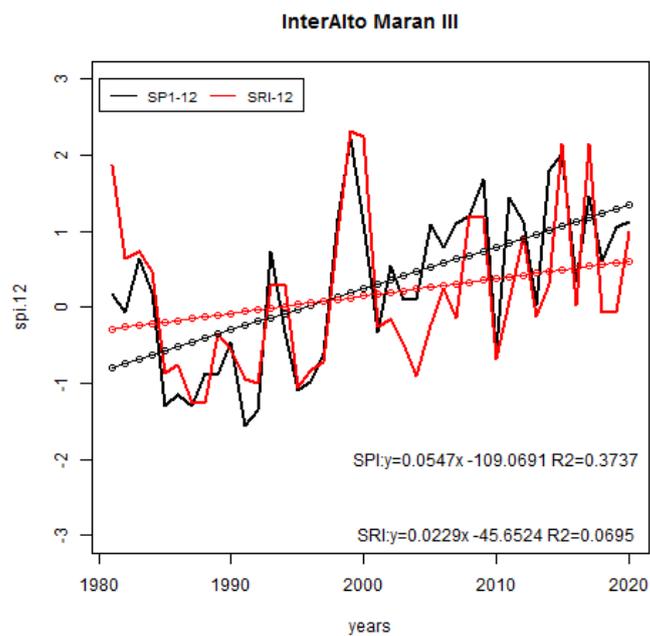


Figura A.19. Evolución temporal de índices SPI-12 y SRI-12 en la Cuenca InterAlto Maranón III.

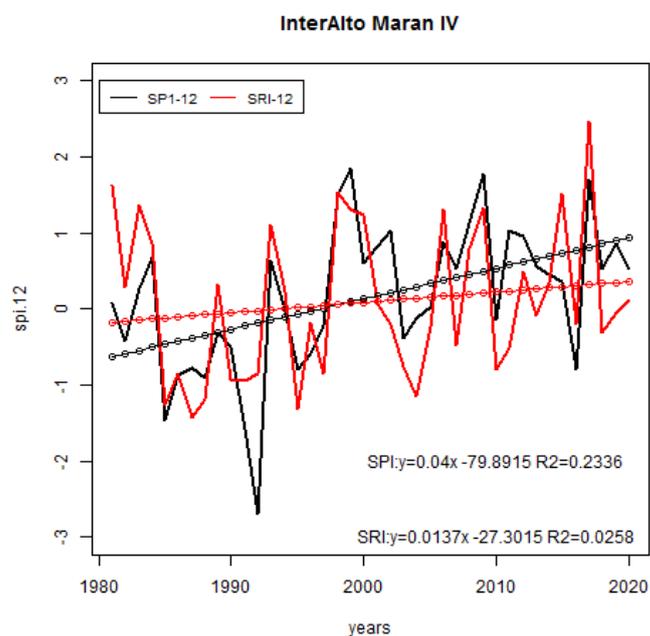


Figura A.20. Evolución temporal de índices SPI-12 y SRI-12 en la Cuenca InterAlto Maranón IV.

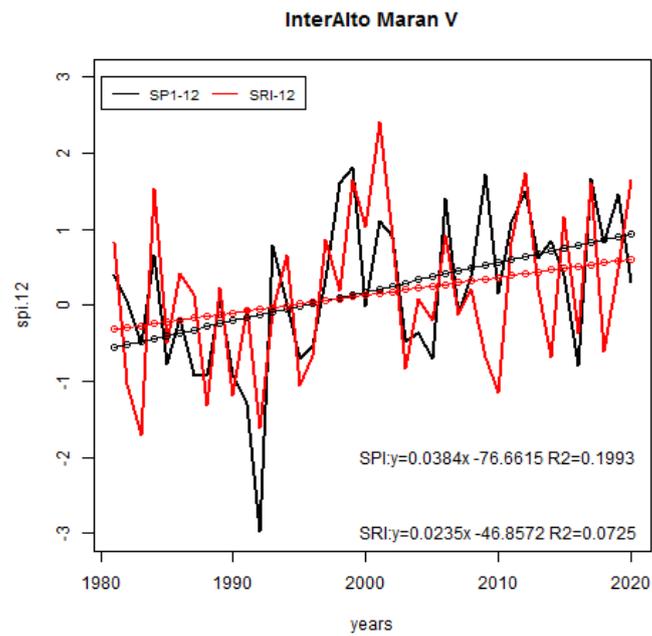


Figura A.21. Evolución temporal de índices SPI-12 y SRI-12 en la Cuenca InterAlto Marañón V.

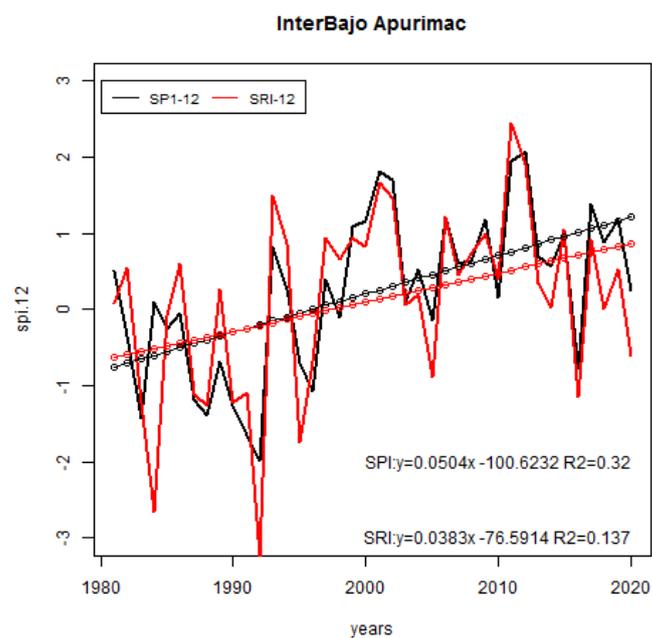


Figura A.22. Evolución temporal de índices SPI-12 y SRI-12 en la Cuenca Apurímac.

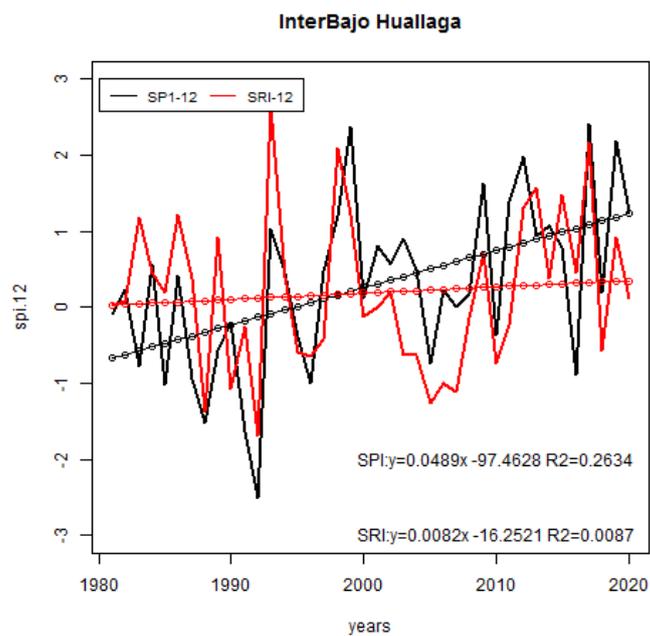


Figura A.23. Evolución temporal de índices SPI-12 y SRI-12 en la Cuenca Interbajo Huallaga.

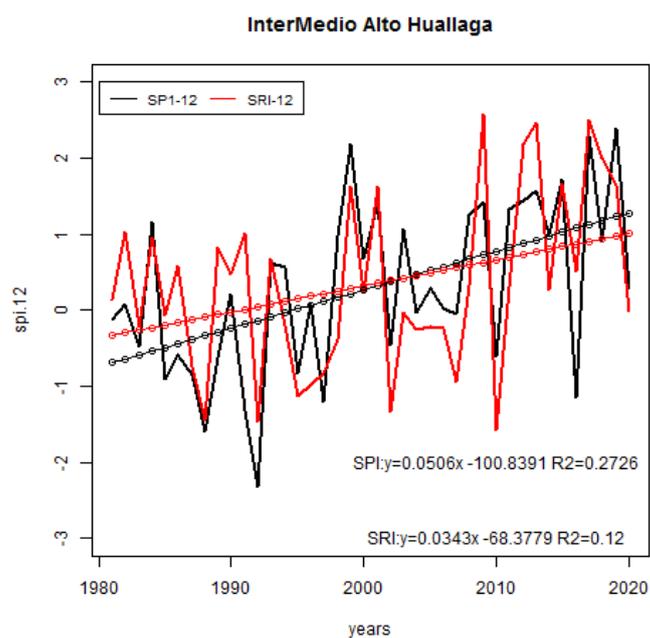


Figura A.24. Evolución temporal de índices SPI-12 y SRI-12 en la Cuenca Intermedio Alto Huallaga.

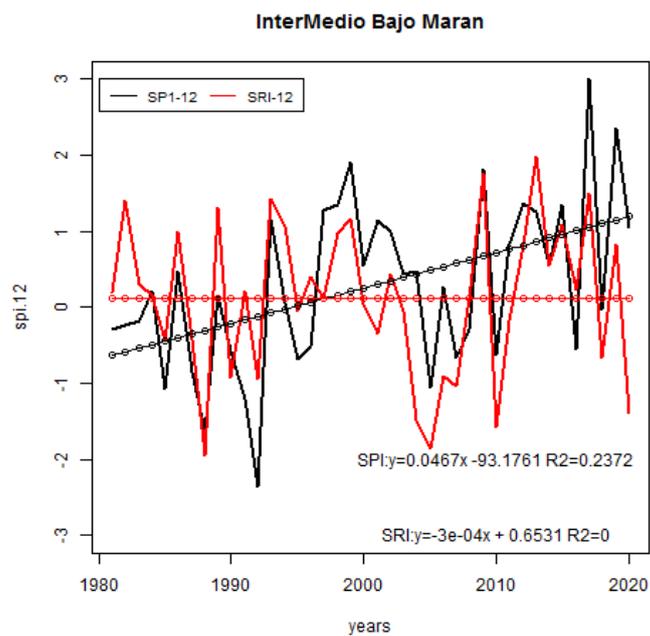


Figura A.25. Evolución temporal de índices SPI-12 y SRI-12 en la Cuenca Intermedio Bajo Marañón.

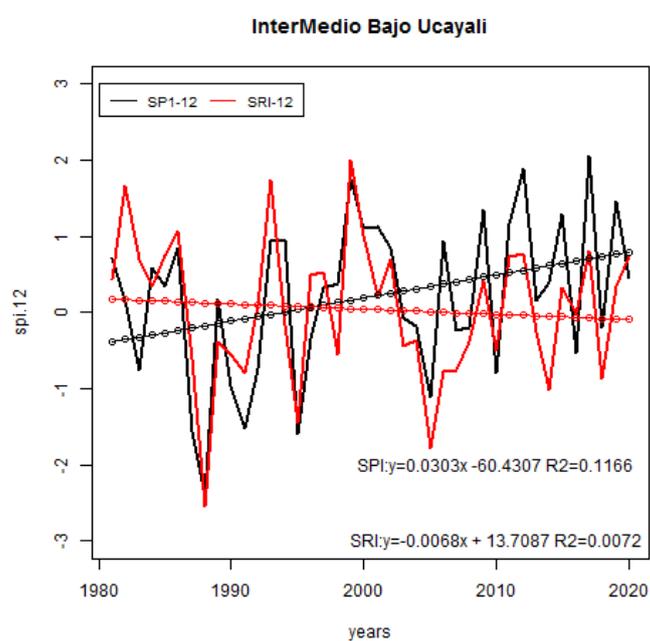


Figura A.26. Evolución temporal de índices SPI-12 y SRI-12 en la Cuenca Intermedio Bajo Ucayali.

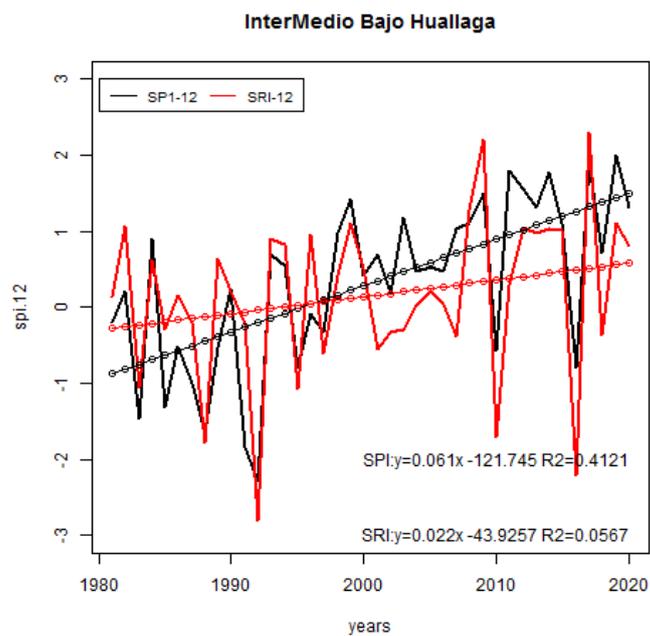


Figura A.27. Evolución temporal de índices SPI-12 y SRI-12 en la Cuenca Intermedio bajo Huallaga

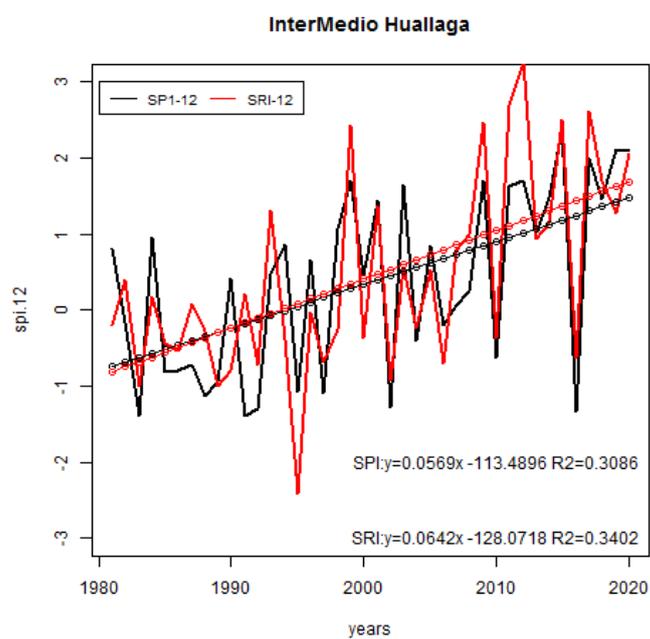


Figura A.28. Evolución temporal de índices SPI-12 y SRI-12 en la Cuenca Intermedio Huallaga

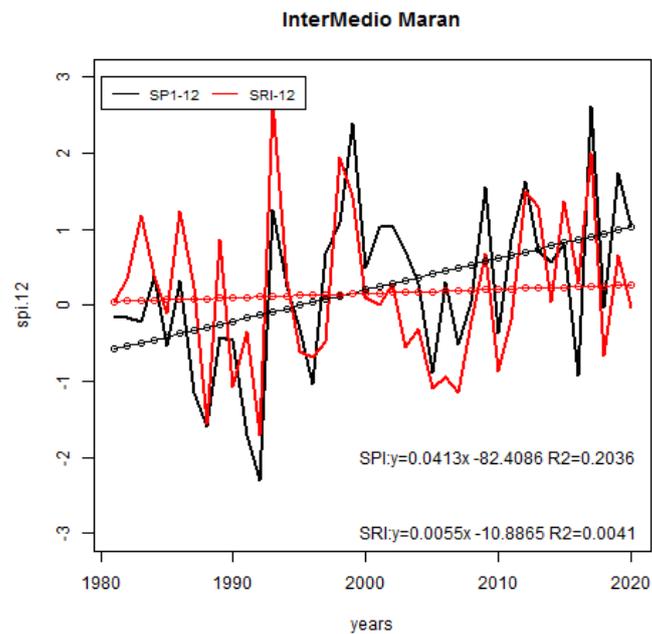


Figura A.29. Evolución temporal de índices SPI-12 y SRI-12 en la Cuenca Intermedio Marañón

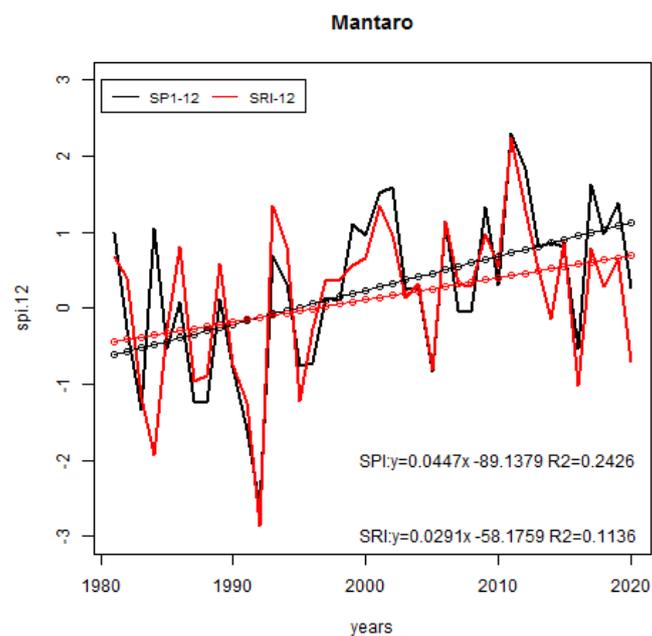


Figura A.30. Evolución temporal de índices SPI-12 y SRI-12 en la Cuenca Mantaro

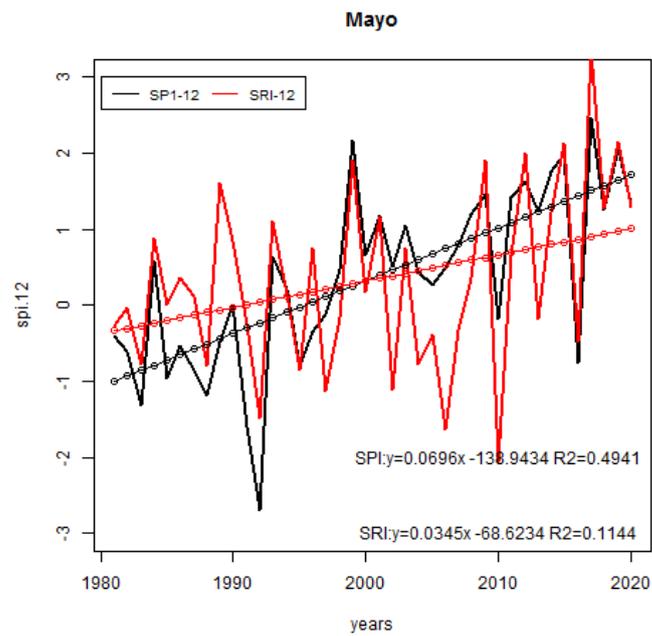


Figura A.31. Evolución temporal de índices SPI-12 y SRI-12 en la Cuenca Mayo

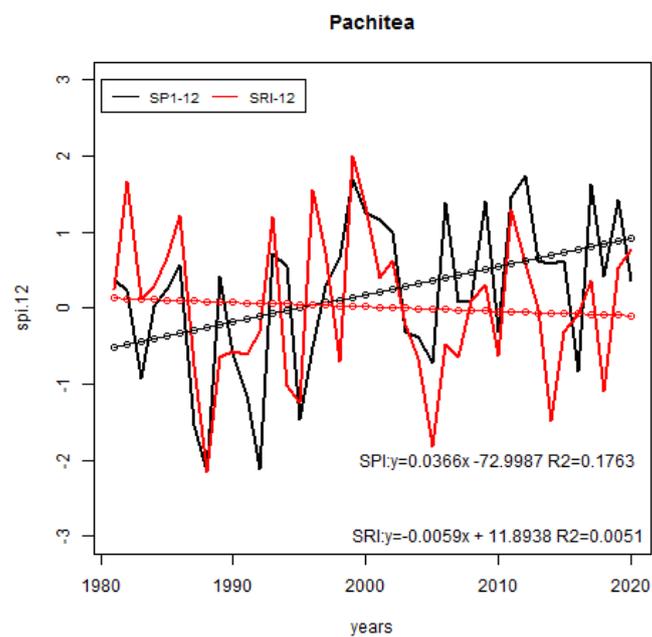


Figura A.32. Evolución temporal de índices SPI-12 y SRI-12 en la Cuenca Pachitea

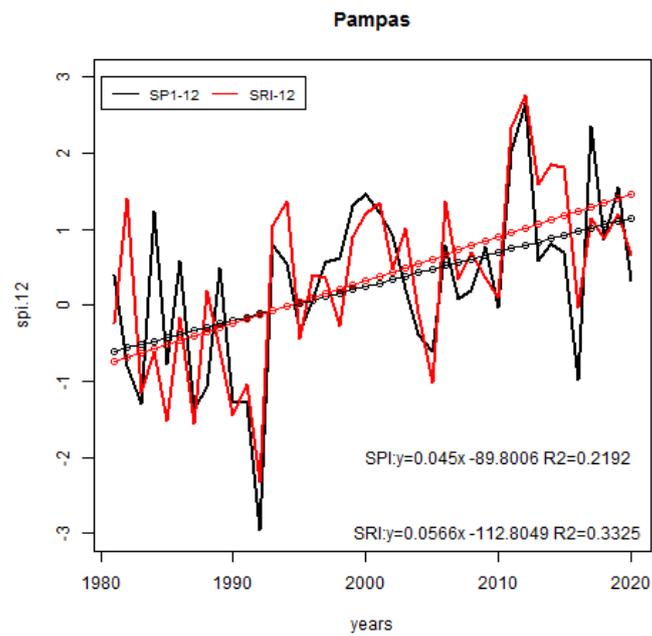


Figura A.33. Evolución temporal de índices SPI-12 y SRI-12 en la Cuenca Pampas

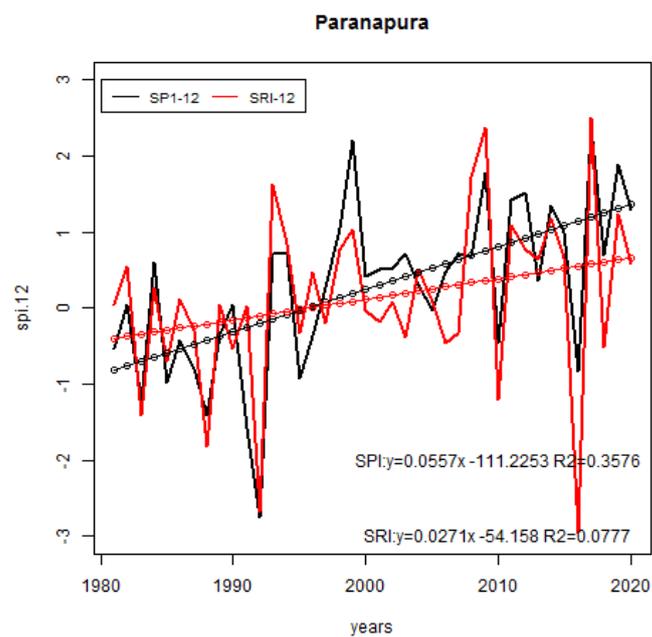


Figura A.34. Evolución temporal de índices SPI-12 y SRI-12 en la Cuenca Paranapura

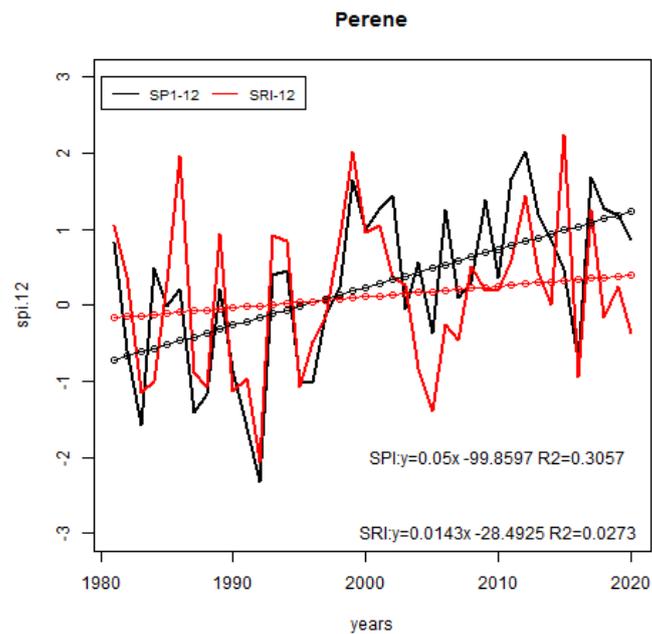


Figura A.35. Evolución temporal de índices SPI-12 y SRI-12 en la Cuenca Perené

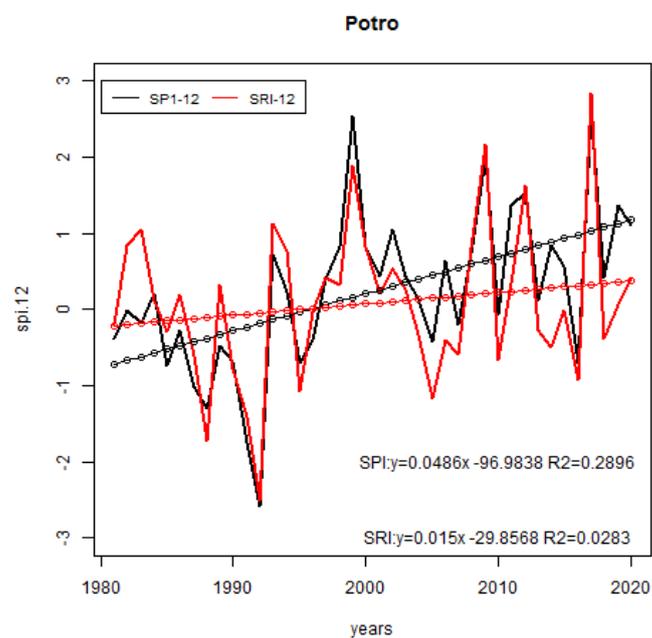


Figura A.36. Evolución temporal de índices SPI-12 y SRI-12 en la Cuenca Potro

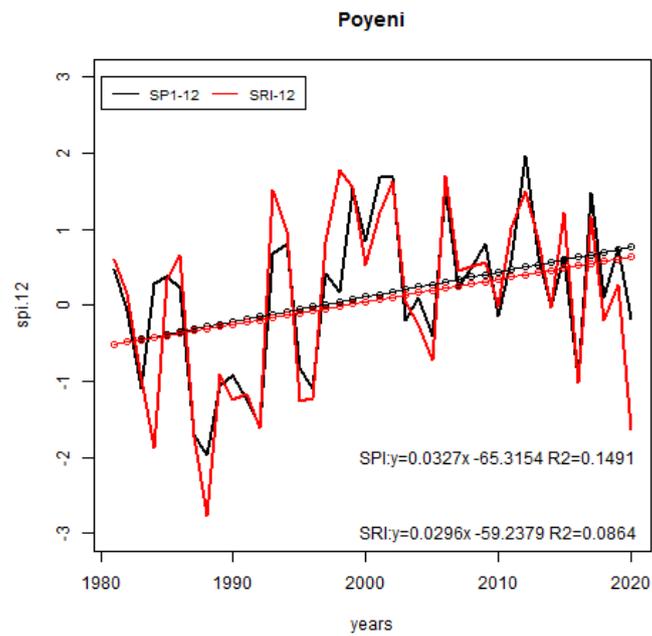


Figura A.37. Evolución temporal de índices SPI-12 y SRI-12 en la Cuenca Poyeni

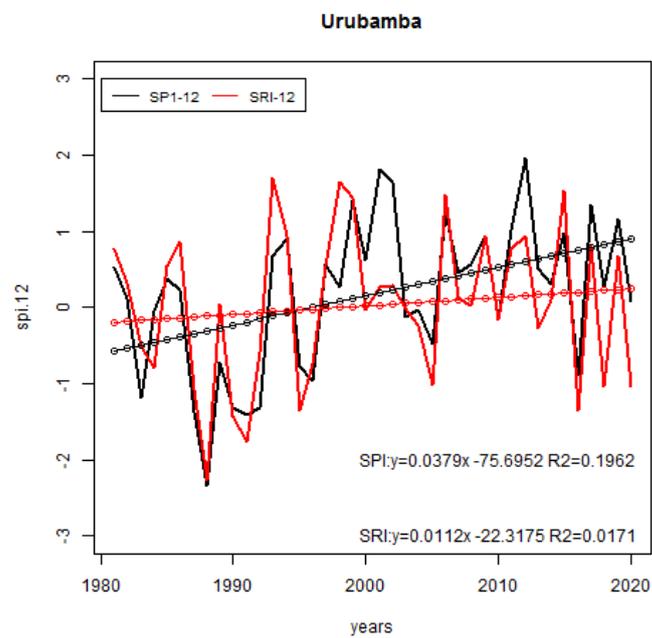


Figura A.38. Evolución temporal de índices SPI-12 y SRI-12 en la Cuenca Urubamba

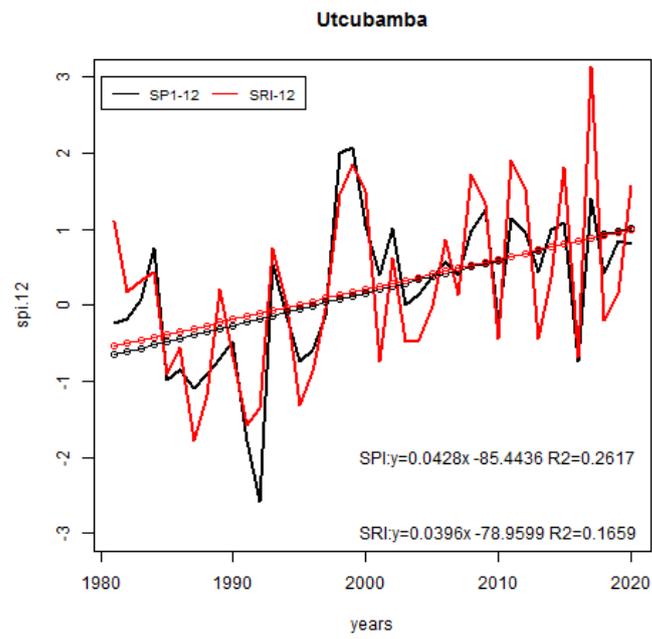


Figura A.39. Evolución temporal de índices SPI-12 y SRI-12 en la Cuenca Utcubamba

Árboles de clasificación Land cover 1985 (L5)

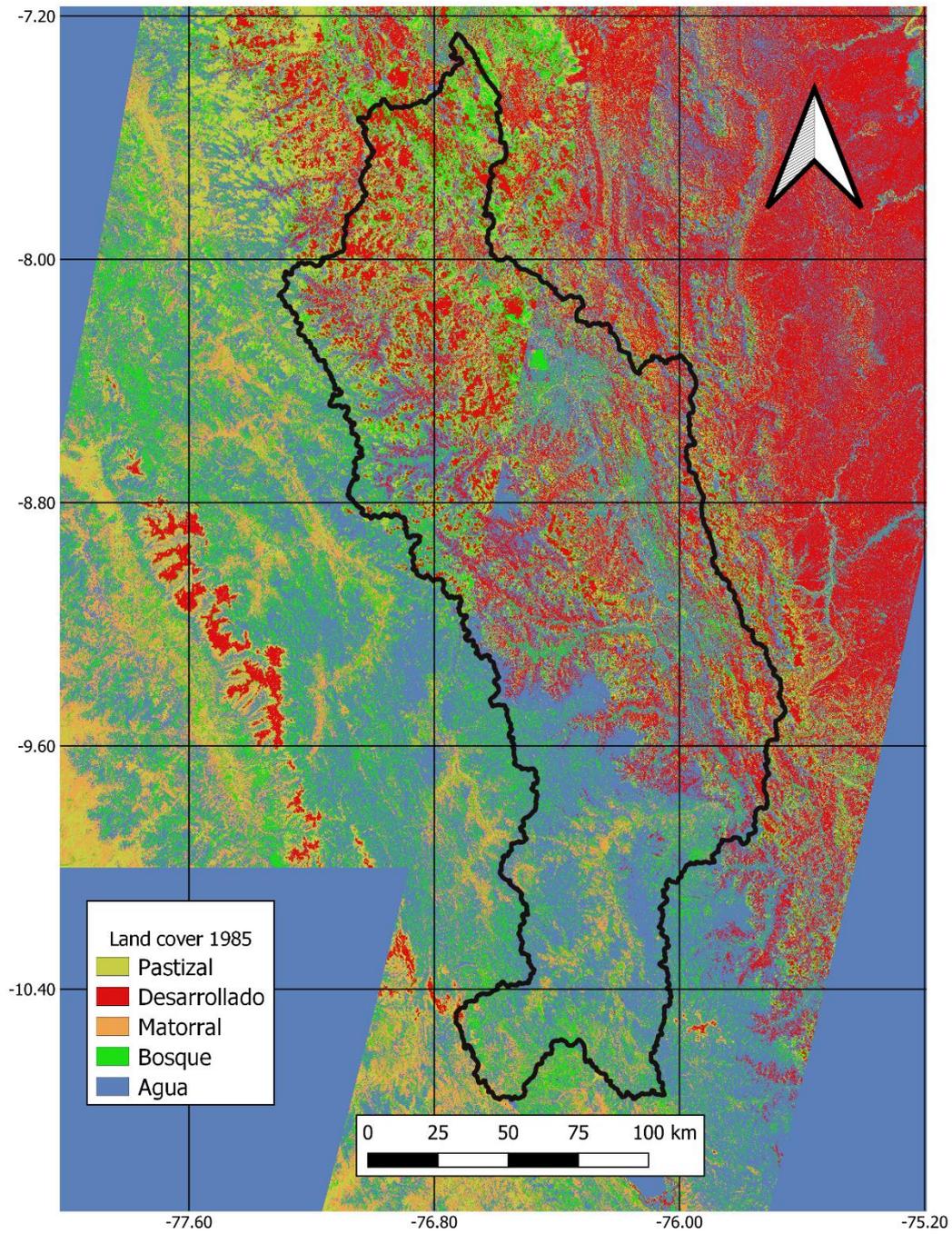


Figura A.40. Uso de suelo (1985), Landsat 5.