



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Facultad de Ciencias Químicas
Carrera de Ingeniería Ambiental

“Análisis de la relación entre la sequía hidrológica, los factores climáticos a gran escala y cobertura vegetal, en las cuencas de los ríos Machángara y Tomebamba”.

*Trabajo de titulación previo a la obtención
del título de Ingeniera Ambiental*

Autora:

Gabriela Alexandra Nieves Chungata
C.I. 0105369482

Tutora:

Ing. Alexandra Elizabeth Guanuchi Quito, MSc.
C.I. 0104604665

Asesor:

Ing. Alex Manuel Avilés Añazco, PhD.
C.I. 0102247186

Cuenca – Ecuador

11/07/2019

RESUMEN

Los cambios en los patrones climáticos globales, modifican el clima regional, provocando un aumento en la frecuencia de sucesos hidrológicos extremos como la sequía. Las cuencas andinas de los ríos Machángara y Tomebamba, brindan servicios ecosistémicos esenciales para la región sur del Ecuador, y también son propensas a sufrir alteraciones en su hidrología por la influencia de factores macroclimáticos. En este estudio se analizó las relaciones entre la sequía hidrológica y agrícola de las cuencas mencionadas, con índices climáticos de los océanos Pacífico y Atlántico. Para caracterizar los eventos de sequía hidrológica, se utilizó el índice de caudal estandarizado (SSI) y para la sequía agrícola, el índice de condición de la vegetación (VCI). Se emplearon dos métodos de correlación, el primero de correlación cruzada entre SSI&VCI, y el segundo de coherencia wavelet entre los índices climáticos y SSI-VCI. Los resultados muestran que (1) no existe una asociación evidente entre los dos tipos de sequía; (2) los índices del Pacífico asociados al ENSO influyen en el VCI y SSI; (3) los índices Niño 4 y TNI se vinculan mejor con el SSI de la cuenca del Machángara, y MEI, ONI y SOI, con el SSI de la cuenca del Tomebamba; (4) el índice TSA del Atlántico tiene un efecto notable en las sequías hidrológicas y agrícolas de la cuenca del río Tomebamba. Los resultados obtenidos aportan una base para futuros estudios de la variabilidad hidrológica en las cuencas andinas, con el fin de minimizar la incertidumbre y vulnerabilidad al riesgo de sequías.

Palabras clave: Cuenca andina. Factores macroclimáticos. ENSO. Coherencia wavelet.

ABSTRACT

Changes in global climatic patterns modify the regional climate; which leads to an increase in the frequency of extreme hydrological events, such as droughts. The Andean basins of the Machángara and Tomebamba rivers provide essential ecosystem services for the southern region of Ecuador, and are also prone to alterations in their hydrology due to the influence of macroclimatic factors. The aim of this study was to analyze the relationships among the hydrological and agricultural drought of the mentioned basins with climate indices of the Pacific and Atlantic oceans. The standardized flow index (SSI) and the vegetation condition index (VCI) were used to characterize hydrological drought events and the agricultural drought respectively. Two correlation methods were estimated. Cross-correlation between SSI & VCI, and wavelet coherence between climate indices and SSI-VCI. The results suggest that (1) there is no obvious association between the two types of drought. (2) The Pacific indices associated with the ENSO influence the VCI and SSI. (3) The Niño 4 and TNI indices are better linked to the SSI of the Machángara basin, and MEI, ONI and SOI, with the SSI of the Tomebamba basin. (4) The Atlantic TSA index has a remarkable effect on the hydrological and agricultural droughts of the Tomebamba river basin. The results obtained provide a basis for future studies of hydrological variability in the Andean basins, in order to minimize uncertainty and vulnerability to drought risk.

Keywords: Andean basin. Macroclimatic factors. ENSO. Wavelet coherence.

**CONTENIDO**

RESUMEN	2
ABSTRACT	3
CONTENIDO	4
INTRODUCCIÓN	13
Justificación.....	13
Objetivo general	14
Objetivos específicos.....	14
CAPÍTULO I.....	15
1. MARCO TEÓRICO	15
1.1. Sequía	15
1.2. Índices de sequía hidrológica.....	15
1.2.1. Índice estandarizado de sequía de caudales (SSI)	16
1.3. Índices de sequía agrícola-vegetación	16
1.3.1. Índice de Condición de la Vegetación (VCI).....	17
1.4. Factores climáticos	18
1.4.1. Factores climáticos a gran escala	18
1.4.2. Índices Climáticos	18
1.5. Transformada Wavelet.....	19
1.5.1. Escala.....	20
1.5.2. Desplazamiento o posición	21
1.5.3. Transformada Wavelet Continua.....	22
1.5.4. Transformada Wavelet Cruzada	24
CAPÍTULO II.....	25
2. MATERIALES Y MÉTODOS	25
2.1. Área de estudio.....	25
2.1.1. Descripción cuenca del río Machángara	25
2.1.2. Descripción cuenca del río Tomebamba	26
2.2. Fuente de variables	26
2.2.1. Índice de caudales estandarizado (SSI).....	26
2.2.2. Índice de condición de la vegetación (VCI)	27
2.2.3. Índices climáticos a escala global	27
2.3. Metodología	27
2.3.1. Análisis estadístico	28



2.3.2.	Cálculo del Índice estandarizado de sequía de caudales (SSI).....	29
2.1.1.	Cálculo del Índice de Condición de la Vegetación (VCI)	30
2.1.2.	Método de correlación cruzada de series de tiempo	31
2.1.3.	Método de Coherencia Wavelet (CW).....	33
2.1.4.	Nivel de significación	33
CAPÍTULO III.....		34
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	34
3.1.	Tratamiento de datos	34
3.1.1.	Análisis exploratorio de las series de caudales-Prueba estadística de Grubbs 34	
3.1.2.	Análisis de tendencia mediante la prueba Mann Kendall	35
3.2.	Caracterización de la sequía hidrológica según el SSI.....	35
3.2.1.	Selección de la distribución de probabilidad	36
3.2.2.	Obtención del Índice Estandarizado de Sequía Hidrológica (SSI).....	36
3.2.3.	Duración, Intensidad y Magnitud.....	38
3.3.	Caracterización de la sequía agrícola según el VCI.	43
3.4.	Correlación cruzada entre el SSI y VCI.....	46
3.5.	Relación del índice de condición de vegetación con índices climáticos.....	49
3.6.	Relación del índice de sequía hidrológica con índices climáticos a gran escala....	53
4.	CONCLUSIONES	60
5.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	63
6.	ANEXOS.....	68

FIGURAS

Figura 1. Comparación de las ventanas de tiempo en el análisis TCF y Wavelet.....	20
Figura 2. Esquema de la transformación wavelet continua.	22
Figura 3. Ejemplo de escalas intermedias dentro de una octava (Nv=10).	22
Figura 4. Mapa de localización de las cuencas en estudio.....	25
Figura 5. Esquema para la identificación y caracterización de las sequías hidrológicas.....	30
Figura 6. Prueba estadística de Grubbs para la serie temporal Chanlud.....	34
Figura 7. Prueba estadística de Grubbs para la serie temporal Matadero en Sayausí.	35
Figura 8. Evolución temporal del SSI a escala mensual, trimestral, semestral y anual. Chanlud, cuenca del río Machángara.....	37
Figura 9. Evolución temporal del SSI a escala mensual, trimestral, semestral y anual. El Labrado, cuenca del río Machángara.....	37
Figura 10. Evolución temporal del SSI a escala mensual, trimestral, semestral y anual. Matadero en Sayausí, cuenca del río Tomebamba.	38
Figura 11. Evolución temporal del SSI 1, con la duración de los principales eventos de sequía. Chanlud, cuenca del río Machángara.	39
Figura 12. Evolución temporal del SSI 1, con la duración de los principales eventos de sequía. Matadero en Sayausí, cuenca del río Tomebamba.....	39
Figura 13. Evolución temporal del VCI. Microcuencas del Río Tomebamba.	43
Figura 14. Evolución temporal del VCI. Microcuencas del Río Machángara.....	44
Figura 15. Principales meses secos durante el año 2007. Microcuencas del río Tomebamba.	44
Figura 16. Autocorrelaciones de residuales. Cuenca del río Tomebamba.....	46
Figura 17. Comprobación de la estacionariedad de las series de tiempo Labrado y Chanlud. Cuenca del río Machángara.....	47
Figura 18. Comprobación de la cointegración de residuales de las regresiones SSI-VCI, cuenca de río Machángara.....	47
Figura 19. Correlación cruzada SSI-VCI, cuenca del río Tomebamba.	48
Figura 20. Correlación cruzada SSI-VCI, cuenca del río Machángara.....	48
Figura 21. Coherencia Wavelet entre VCI de la cuenca del río Tomebamba y los índices climáticos (BEST, Niño 1+2, TSA). El nivel de significación del 5% se muestra con contorno grueso.....	50
Figura 22. Coherencia Wavelet entre los índices climáticos (ESPI, Niño 4, PDO) y el VCI de la cuenca del río Machángara. El nivel de significación del 5% se muestra con contorno grueso.....	51



Figura 23. Coherencias significativas entre SSI Chanlud e índices climáticos. Cuenca del río Machángara..... 54

Figura 24. Coherencias significativas entre SSI Labrado e índices climáticos. Cuenca del río Machángara..... 55

Figura 25. Coherencias significativas entre SSI Matadero en Sayausí e índices climáticos. Cuenca del río Tomebamba..... 56



TABLAS

Tabla 1. Principales índices climáticos a gran escala.....	18
Tabla 2. Datos de estaciones pertenecientes a las cuencas Tomebamba y Machángara... 26	
Tabla 3. Clasificación de sequía hidrológica según SSI.	29
Tabla 4. Clasificación del VCI.	31
Tabla 5. Resumen de resultados del tratamiento de datos.....	35
Tabla 6. Distribuciones de probabilidad con mejor ajuste para cada mes para el SSI.....	36
Tabla 7. Eventos de sequía de mayor duración para las cuencas del río Machángara y Tomebamba.....	40
Tabla 8. Cuantificación de los meses de sequía y cálculo de intensidades. Cuencas de los ríos Machángara y Tomebamba.	41
Tabla 9. Resultados obtenidos según el VCI. Cuencas de los ríos Tomebamba y Machángara.....	45
Tabla 10. Resultados de la correlación cruzada entre SSI-VCI para las cuencas Tomebamba y Machángara.	48
Tabla 11. Periodos y fechas de coherencia cuadrática significativa entre los índices climáticos y VCI.	51



Cláusula de Propiedad Intelectual

Gabriela Alexandra Nieves Chungata, autora del trabajo de titulación "Análisis de la relación entre la sequía hidrológica, los factores climáticos a gran escala y cobertura vegetal, en las cuencas de los ríos Machángara y Tomebamba", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autora.

Cuenca, 04 de Julio de 2019

A handwritten signature in purple ink, appearing to read "Gabriela Nieves", written over a horizontal line.

Gabriela Alexandra Nieves Chungata

C.I: 0105369482



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio
Institucional

Gabriela Alexandra Nieves Chungata en calidad de autora y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Análisis de la relación entre la sequía hidrológica, los factores climáticos a gran escala y cobertura vegetal, en las cuencas de los ríos Machángara y Tomebamba", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

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

Cuenca, 04 de Julio de 2019

Gabriela Alexandra Nieves Chungata

C.I: 0105369482



AGRADECIMIENTOS

A todos los docentes y amigos, que han compartido su tiempo y conocimientos, y me han motivado a ser mejor cada día y culminar una meta más en mi vida.



DEDICATORIA

A Dios, por forjar mi camino y ayudarme a superar cada dificultad en la vida, por permitirme tener y disfrutar de un hogar.

A mi familia, por sus sacrificios y esfuerzo, para verme triunfar. A mi abuela, aunque nunca jamás lo leerá, pero desde algún lugar en el universo guía mis pasos. Porque gracias a ti soy la persona que soy.

A la vida, por enseñarme lo hermoso que es vivir

A la persona más fuerte que conozco: yo.

INTRODUCCIÓN

La variabilidad climática de una región generalmente se asocia con patrones globales que se vinculan con oscilaciones atmosféricas. Por ejemplo, en el océano Pacífico, el fenómeno El Niño-Oscilación del Sur, ENOS o ENSO (inglés), causa fluctuaciones periódicas en escalas estacionales e interanuales, como consecuencia de la interacción entre el océano y la atmósfera; en el océano Atlántico, el desplazamiento de la Zona de Convergencia Intertropical del Sur (ZCIT), genera un fuerte ciclo estacional en la Zona Tropical (Araújo & Brito, 2011).

El cambio climático originado por fuentes naturales y en especial antropogénicas, ha potenciado cambios en los patrones climáticos globales, que a su vez induce diferentes modificaciones y respuestas en el clima según la región (Iniyan, Goic, & Vijayavenkataraman, 2012). Según el cuarto informe del Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), desde los años 70, se ha incrementado la frecuencia de las precipitaciones intensas y la superficie afectada por la sequía (Bernstein et al., 2008). La importancia de la sequía no puede subestimarse, pues ocupa el primer lugar entre todas las amenazas naturales cuando se mide en términos del número de personas afectadas y las pérdidas económicas asociadas con su ocurrencia. En efecto, se espera que la sequía aumente en frecuencia y gravedad en el futuro, principalmente como consecuencia de la disminución de las precipitaciones regionales que dependen fuertemente de los procesos climáticos globales (Leng, Tang, & Rayburg, 2015).

Las cuencas de los ríos Machángara y Tomebamba, importantes para la ciudad de Cuenca y en general para la región sur del Ecuador, no son ajenas a los eventos de sequía meteorológica, agrícola o hidrológica, ocasionadas por alteraciones en la precipitación, humedad del suelo y déficit de caudal, respectivamente. Dichas cuencas, caracterizadas por ecosistemas frágiles, brindan servicios ecosistémicos esenciales como el abastecimiento de agua y generación de energía hidroeléctrica (Rojas & Melchor, 2016).

Justificación

Habiendo fundamentado la relevancia de las cuencas Machángara y Tomebamba, la sequía, y la asociación entre el clima local y los patrones climáticos específicamente vinculados a los Océanos Pacífico y Atlántico, es importante cuantificar y evaluar las relaciones entre los mismos. Sin embargo, al realizar correlaciones simples, se presentan deficiencias y muchas veces no se evidencia relaciones existentes más allá del campo del tiempo.

De esta manera, en el presente estudio se analizaron las relaciones entre índices que caracterizan la sequía hidrológica y sequía agrícola de las cuencas Machángara y Tomebamba con índices climáticos de los Océanos Pacífico y Atlántico. Para lo cual, se empleó correlación cruzada y análisis wavelet, este último permite analizar series de datos en el espacio tiempo- frecuencia (Misiti, 2007). Con ello se precisó el conocimiento de la influencia de los factores macroclimáticos en la variabilidad climática local, que afecta al nivel de aguas superficiales y también a la vegetación de la zona.

En primer lugar, se caracterizó ambas cuencas en estudio mediante el índice estandarizado de caudales (SSI) que permite conocer la duración e intensidad de los eventos de sequía hidrológica y el índice de condición de la vegetación (VCI) que identifica el estado de la vegetación del área y determina los eventos de sequía agrícola. Posteriormente se evaluó la relación entre los mismos mediante correlación cruzada. Luego, se determinó la influencia de los principales índices climáticos globales en la sequía y vegetación, mediante coherencia cuadrática Wavelet, que mide la correlación de dos series de tiempo o señales en diferentes escalas.

Objetivo general

Analizar la relación entre la sequía hidrológica, los factores climáticos a gran escala y cobertura vegetal en las cuencas de los ríos Tomebamba y Machángara.

Objetivos específicos

- Determinar el índice de sequía y cobertura vegetal para caracterizar las cuencas de los ríos Tomebamba y Machángara.
- Determinar las relaciones entre los factores climáticos, índices de sequía hidrológica e índices de cobertura vegetal mediante correlaciones.
- Identificar los factores climáticos del Pacífico y Atlántico que influyen en la variabilidad climática de las cuencas en estudio.

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Sequía

Se define comúnmente como la disponibilidad de agua inferior a la normal, se considera también como una desviación del ciclo estacional al que están adaptados la sociedad y el ecosistema, lo que significa que las sequías también ocurren en la temporada de flujo alto (Van Loon & Laaha, 2015). Se subdivide en diferentes tipos en relación con las variables del ciclo hidrológico, entre las cuales las más importantes son:

- *Sequía meteorológica*: se relaciona con la desviación de la precipitación respecto a la media durante un periodo de tiempo determinado (Valiente, 2001).
- *Sequía agrícola*: se genera cuando la humedad del suelo no es suficiente e impide el desarrollo de un determinado cultivo en cualquier etapa de su crecimiento (Valiente, 2001).
- *Sequía hidrológica*: hace referencia al déficit de caudal o volumen de aguas superficiales o subterráneas. Está determinada por la propagación de la sequía meteorológica a través del ciclo hidrológico terrestre, se define como la disminución en la disponibilidad de aguas superficiales y subterráneas durante un plazo temporal dado, respecto a los valores medios (Tallaksen & Van Lanen, 2004).

De los tipos sequía mencionados, se seleccionó las sequías hidrológica y agrícola, la primera por su impacto directo en la disminución de caudales y consecuentemente en los niveles de los embalses, de gran importancia para la dotación de agua potable e hidroelectricidad. Y la segunda, por su efecto en la vegetación.

1.2. Índices de sequía hidrológica

Los eventos de sequía se pueden evaluar y cuantificar mediante los índices de sequía, los cuales son indicadores indirectos basados en información climática y han sido de utilidad para detectar y monitorear este fenómeno (Esquivel, Hurtado, Sánchez, & Velásquez, 2014). Para analizar la sequía hidrológica se pueden utilizar diferentes métodos entre ellos:

- *Índice hidrológico de sequía de Palmer (PHDI)*: detectan las anomalías de humedad que afectan al flujo de agua superficial, la disponibilidad de agua en el suelo y el nivel de agua en lagos y embalses (Valiente, 2001). Calcula el momento en que una sequía terminará sobre la base de la precipitación necesaria, mediante una relación de la humedad recibida con la humedad necesaria para que finalice una sequía (Jacobi, Perrone, Duncan, & Hornberger, 2013).

- *Índice normalizado del nivel de agua (SWI)*: fue creado en el Instituto de Tecnología de la India y es utilizado para evaluar los déficits de recarga de agua subterránea. Tiene la desventaja de que se toman datos de pozos para analizar el efecto de la sequía y los resultados se interpolan entre puntos, los que puede ocasionar que la evaluación realizada no sea representativa de la región o el régimen climático (Bhuiyan, 2004).
- *Índice agregado de sequía (ADI)*: se considera un índice de sequía regional, utiliza distintas variables y analiza todos los recursos hídricos en diferentes escalas de tiempo, por lo que su aplicación es compleja (Esquivel et al., 2014).
- *Índice de sequía de caudales fluviales (SDI)*: propuesto por Nalbantis y Tsakiris, emplea valores mensuales de los caudales y un método de normalización para toda la serie analizada (Esquivel et al., 2014).
- *Índice estandarizado de sequía de caudales (SSI)*: es uno de lo más sencillos y eficaces (Esquivel et al., 2014), por lo cual se seleccionó este índice para el presente estudio, los detalles del mismo se describen en el siguiente apartado.

1.2.1. Índice estandarizado de sequía de caudales (SSI)

Fue desarrollado a partir del índice de sequía de caudales, propuesto por Nalbantis y Tsakiris (Boudad, Sahbi, & Mansouri, 2018). El índice estandarizado de caudales (SSI) utiliza el mismo principio que el índice estandarizado de precipitación, es decir, consiste básicamente en la agregación de datos de caudal en periodos de acumulación que pueden variar entre 1, 3, 6 o 12 meses. Posteriormente se ajusta una función de distribución de probabilidad para cada mes y se procede a normalizar la misma. Ofrece de esta manera, la ventaja de caracterizar la sequía hidrológica a corto, mediano y largo plazo (Zhiña Villa, 2016).

1.3. Índices de sequía agrícola-vegetación

Representa un valor generado tras el procesamiento de información satelital contenida en una imagen multibanda, dicho valor es sensible a la cobertura vegetal, por lo tanto, a través de los mismos se puede evaluar y monitorear el estado de la vegetación de un área determinada (Liu & Kogan, 1996). Se han desarrollado varios índices, siendo los más utilizados los descritos a continuación:

- *Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)*: Es una herramienta útil basada en análisis satelital, para medir y monitorear condiciones ambientales como: la simulación de condiciones de cultivo, estimación de rendimiento, degradación de

tierras, estudios de tierras secas, entre otros. Minimiza los efectos topográficos y produce una escala lineal de medición que permite establecer umbrales y comparar imágenes. Tiene la desventaja de ser sensible a la reflectividad del suelo de la planta limitando su potencial de discriminación (Dutta, Kundu, Patel, Saha, & Siddiqui, 2015).

- *Índice de vegetación mejorado (EVI)*: es una versión mejorada del NDVI, utiliza los datos proporcionados por el sensor MODIS del satélite Terra lanzado en el año 1999 por la NASA. Es más sensible a las variaciones de dosel, la arquitectura y fisionomía vegetal, pues corrige las distorsiones en la luz reflejada por la presencia de nubes y aerosoles en la capa atmosférica que dificultan la visión de los satélites (Roldán & Poveda, 2006). Un punto débil de este índice es que el periodo de registro de datos es corto dificultando de esta manera estudios climáticos (A. Huete et al., 2002).
- *Índice de las condiciones de temperatura (TCI)*: se utiliza para determinar estrés en la vegetación como consecuencia de la temperatura y humedad excesiva. Se suele utilizar junto con el NDVI y el VCI para analizar situaciones en las que la sequía causa efectos principalmente en la agricultura (Kogan, 1995).
- *Índice de salud de la vegetación (VHI)*: se emplea para vigilar y detectar los efectos de los eventos de sequía en la agricultura utilizando datos obtenidos de los canales visibles, infrarrojo y próximos al infrarrojo, tiene alta resolución y cobertura en todo el mundo; sin embargo, su periodo de registro de datos es reducido (Kogan, 2001).
- *Índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI)*: es similar al NDVI, pero SAVI considera las variaciones en los suelos evitando su influencia en las mediciones de cobertura vegetal. Su cálculo es complejo al igual que la información de entrada no es fácil acceso (Huete, 1988).
- *Índice de condiciones de la vegetación (VCI)*: utiliza bandas térmicas para detectar eventos de sequía especialmente en áreas donde no se distinguen con facilidad. Puede determinar el inicio, duración y la gravedad de la sequía, tiene una alta resolución, buena cobertura vegetal y facilidad de uso (Liu & Kogan, 1996), por lo que este índice se utilizará para evaluar las cuencas en estudio.

1.3.1. Índice de Condición de la Vegetación (VCI)

Se caracteriza por tener una mayor capacidad de reflexión de la sequía en muchas partes del mundo (Lin et al., 2017). Puede estimar el estado de la vegetación de acuerdo con el mejor y el peor vigor de la vegetación durante un período particular en diferentes años, es decir, sirve para identificar el estrés de la vegetación relacionado con la sequía y medir la

intensidad, el tiempo de inicio, la duración, la dinámica y los impactos de la sequía en la condición general de la vegetación (Dutta et al., 2015).

1.4. Factores climáticos

Los factores climáticos, son los agentes que alteran el comportamiento e interacción de variables meteorológicas como la precipitación, humedad, presión atmosférica, etc., determinando las características climáticas de una zona. Los procesos de circulación atmosférica, la influencia de la temperatura de la superficie del mar, junto con los caracteres geográficos son los factores fundamentales que configuran el clima de una región (Tulot, 2000).

1.4.1. Factores climáticos a gran escala

Se relacionan con la teleconexión o patrones climáticos globales, los mismos que por su estructura pueden influir en el tiempo y clima de una zona (Trejo, Barbosa, Ruiz, & Peñaloza-Murillo, 2016). Una teleconexión, es la interacción océano-atmósfera que se da en puntos terrestre distantes y genera modos de variabilidad de baja frecuencia de presión atmosférica y anomalías en la circulación oceánica (Méndez, Ramírez, Cornejo, Zárate, & Cavazos, 2010). El efecto de estos patrones climáticos se evalúa mediante índices, que describen el proceso físico correspondiente (Forchhammer & Post, 2004).

1.4.2. Índices Climáticos

Existen diversos índices que caracterizan los procesos océano-atmósfera en los océanos Pacífico y Atlántico, a continuación, en la *Tabla 1*, se enumera los principales.

Tabla 1. Principales índices climáticos a gran escala.

Índice	Descripción
BEST	Índice Bivariado El Niño-Oscilación del Sur: utiliza la combinación y normalización de la temperatura de la superficie del mar (TSM) en la región de El Niño 3.4 y SOI.
ESPI	Índice de Precipitación de ENSO: se basa en anomalías en la precipitación en dos áreas, una en el Pacífico tropical oriental y la otra en el Continente Marítimo.
MEI	Índice ENSO Multivariado: utiliza seis variables principales observadas en el Pacífico tropical, presión a nivel del mar, componentes zonales y meridionales del viento en la superficie, temperatura de la superficie del mar, temperatura del aire en la superficie y fracción de nubosidad total en el cielo.
NAO	Oscilación del Atlántico Norte: Se define como la alteración de la masa atmosférica entre las regiones subtropical y subpolar del océano Atlántico Norte, específicamente se basa en las fluctuaciones en la diferencia de presión a nivel del mar en la superficie entre la baja islandesa y la alta Azores.
NIÑO 1+2	Es la reagrupación del índice de las regiones 1 y 2, se caracteriza por iniciar con una anomalía positiva de TSM frente al desarrollo del fenómeno del Niño. Estas regiones tienen una correlación significativa con la precipitación en la zona sur del Ecuador

NIÑO 3	Anomalías en la TSM promediadas en la región 5°S - 5° N, 90° – 150° O.
NIÑO3.4	Anomalías de la TSM promediadas en las regiones NIÑO3 y NIÑO4. Se calcula en la región 5°S - 5° N, 90° – 150° O.
NIÑO 4	Anomalías de la TSM promediadas en la región 5°S - 5° N, 160°W – 120° O.
ONI	Índice Oceánico de El Niño: es una medida de las fases de El Niño-Oscilación del Sur (ENSO). Se calcula con el promedio móvil de tres meses de las anomalías de la TSM en la región Niño 3.4. Valores por encima de 0,5 por tres meses consecutivos, se vinculan con eventos Niño e inferiores a -0,5, a eventos Niña.
PDO	Oscilación Decadal del Pacífico: se define por las anomalías de la TSM en el Pacífico Norte.
PNA	Pacífico-América del Norte: considera las anomalías de presión atmosférica desde el Pacífico occidental subtropical hasta la costa este de Norteamérica.
QBO	Oscilación Cuasi-Bienal: es una oscilación cuasi periódica de vientos ecuatoriales zonales, en la estratósfera tropical, con un periodo medio entre 28 a 29 meses.
SOI	Índice de Oscilación Sur: está basado en la diferencia de presiones atmosféricas entre Tahití y Darwin, Australia. Valores positivos, se asocian con eventos La Niña y negativos, con El Niño.
TNA	Índice Tropical del Atlántico Norte: se determina con la TSM en la región 55° W - 15° W, 5° N - 25° N.
TNI	Índice Trans Niño: se define como la diferencia en anomalías de TSM normalizadas entre las regiones Niño 1 + 2 y Niño 4. Mide así el gradiente en anomalías de TSM entre el Pacífico ecuatorial central y oriental.
TSA	Índice Tropical del Atlántico Sur: indicador de la TSM en el golfo de Guinea en el Atlántico Sur oriental tropical. Se determina en la región 30° W -10° E, 20° S - 0°.

Fuente: Andreoli & Kayano (2019) y Díaz & Villegas (2015).

1.5. Transformada Wavelet

Para entender de mejor manera esta herramienta, es necesario primero entender ¿qué es una wavelet? Los datos o señales del mundo real muestran tendencias u oscilaciones que cambian lentamente y pueden estar marcadas o interrumpidas por cambios abruptos que proporcionan información útil para realizar un análisis detallado de datos. La transformada de Fourier es la técnica comúnmente utilizada para el tratamiento de datos; sin embargo, no es eficiente cuando se analiza señales reales con variaciones o discontinuidades abruptas, puesto que esta técnica matemática pierde la información del tiempo cuando se pasa la señal analizada a la base de la frecuencia. (Buzai, Cacace, Humacata, & Lanzelotti, 2015). Para corregir la deficiencia de la transformada de Fourier, Dennis Gabor en 1946, adaptó y desarrolló la transformada corta de Fourier (TCF), que consiste en dividir en partes a la señal que se analiza y estudiar el contenido frecuencial de cada sección. Por ello, se utiliza una función ventana, de esta manera se logra obtener información sobre cuándo y en qué

frecuencias ocurre un evento de señal. El inconveniente de esta técnica, es la precisión limitada determinada por el tamaño de la ventana de tiempo, cuyo tamaño debería variar según las frecuencias bajas o altas; sin embargo, la TCF permite la elección de un tamaño de ventana fijo para todas las frecuencias, restringiendo el análisis detallado y flexible de la señal.

Entonces al ser la transformada de Fourier útil y efectiva únicamente para el análisis de series estacionarias, surge el tema de las wavelets. Asumiendo que se tiene una función wavelet, $\psi_0(\eta)$, que depende de un parámetro de tiempo adimensional η , esta para ser admisible como una wavelet, debe tener una media igual a cero y estar localizada tanto en frecuencia ($\Delta\omega$) como en tiempo (Δt) (Torrence & Compo, 1998); es decir, a diferencia de las ondas sinusoidales utilizadas en Fourier que oscilan infinitamente, una wavelet debe estar localizada en un tiempo finito. Las wavelets pueden ser de diferentes tamaños y formas, lo que se conoce como familia wavelets, las cuales se deben seleccionar de acuerdo a la finalidad de la aplicación (Grinsted, Moore, & Jevrejeva, 2004).

A partir de los principios anteriores, se desarrolla la denominada transformada wavelet, que permite examinar señales en el plano tiempo-frecuencia. Tiene la ventaja de proporcionar un análisis mejorado de áreas con cambios bruscos localizadas de una señal, pues utiliza ventanas de tiempo con regiones de tamaño variable. Esto permite el uso de intervalos de tiempo largos para obtener información más precisa de baja frecuencia e intervalos cortos para información de alta frecuencia (Figura 1).

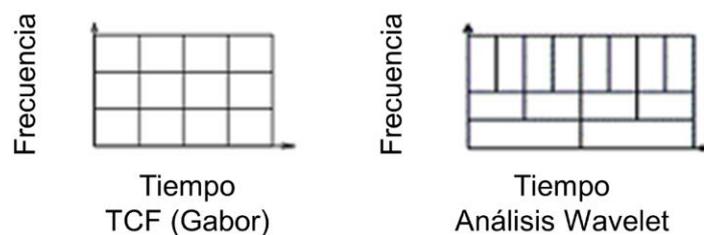


Figura 1. Comparación de las ventanas de tiempo en el análisis TCF y Wavelet.
Fuente: (Grinsted et al., 2004)

Existen dos conceptos importantes dentro de la transformada wavelet: escala y desplazamiento.

1.5.1. Escala

La escala representa lo que coloquialmente se conoce como estirar o reducir una señal en el tiempo, se puede representar mediante la ecuación (1):

$$\psi\left(\frac{t}{s}\right) \quad s > 0 \quad (1)$$

S es el factor de escala, cuyo valor es positivo e indica a cuánto se escala la señal en el tiempo. Existe una relación inversamente proporcional entre escala y frecuencia, que se resume en que a escalas pequeñas se analizan las frecuencias altas y a escalas grandes las frecuencias bajas. Un ejemplo claro, es el analizar datos de temperatura para detectar cambios en diferentes escalas. Con escalas altas se podría observar los cambios de un año a otro o de una década a otra, mientras que con escalas bajas se puede examinar cambios que ocurren día a día.

Dicho de otro modo, si escalamos una onda sinusoidal en 2, es igual a reducir su frecuencia original a la mitad o por una octava; pero como las wavelets no son ondas sinusoidales, no se puede reducir directamente su frecuencia original, sino que se obtiene primero una frecuencia equivalente. Esta utiliza una constante de proporcionalidad denominada frecuencia central de la wavelet (C_f), que tiene una relación recíproca con la escala y frecuencia y se calcula como la potencia pico en la transformada de Fourier de la wavelet. La frecuencia equivalente se define con la siguiente ecuación:

$$F_{eq} = \frac{C_f}{s \Delta t} \quad (2)$$

Donde C_f es la frecuencia central de wavelet, s es la escala wavelet y Δt es el intervalo de muestreo. De esta forma, si escalamos una wavelet por un factor de 2, su frecuencia equivalente se divide entre 2.

1.5.2. Desplazamiento o posición

Desplazar una wavelet significa retrasar o avanzar su inicio a lo largo de la longitud de una señal. Se representa mediante la notación $\varphi(t-k)$, que significa que la wavelet está desplazada y centrada en k .

Existen dos clases principales de transformada wavelet: Transformada Wavelet Continua (CWT, por sus siglas en inglés) y Transformada Wavelet Discreta (DWT, por sus siglas en inglés), la primera es mejor para extraer características en una serie de tiempo (Grinsted et al., 2004), puesto que tiene la capacidad para describir el comportamiento local de las señales en diferentes escalas de tiempo; mientras que, la transformada discreta se utiliza comúnmente para la reconstrucción de señales utilizando wavelet bases, un ejemplo de su aplicación es la compresión de datos; mientras que, la continua, por este motivo se utilizará en el presente estudio la CWT. El término wavelet bases se usa para referirse a un conjunto de wavelets ortogonales (con ángulo recto)

1.5.3. Transformada Wavelet Continua

Se utiliza esta transformación generalmente para realizar un análisis simultáneo de tiempo-frecuencia de una señal. El principio básico de la CWT, es obtener coeficientes, que son una función de escala o frecuencia y tiempo, y mide la similitud entre una señal y una función de análisis. Cuanto mayor sea su valor absoluto, mayor similitud o más transiciones abruptas se registran en las señales. En este caso, la señal corresponde a la serie de tiempo y la función es una wavelet prototipo (wavelet madre).

En la *Figura 2*, se representa un esquema básico de la CWT, dónde en primer lugar, la wavelet escogida se compara con una sección al inicio de la señal y se obtiene un valor del coeficiente wavelet (C). En el segundo punto, se desplaza la wavelet a la derecha y se calcula un nuevo valor de C, este procedimiento se repite hasta cubrir toda la longitud de la señal. En el tercer punto, se cambia la escala de la wavelet (estira o comprime) y se vuelven a repetir los pasos 1 y 2. Los tres pasos se realizan para todas las escalas, obteniendo como resultado una matriz de coeficientes cuyo valor varía según la escala o frecuencia y el intervalo de tiempo.

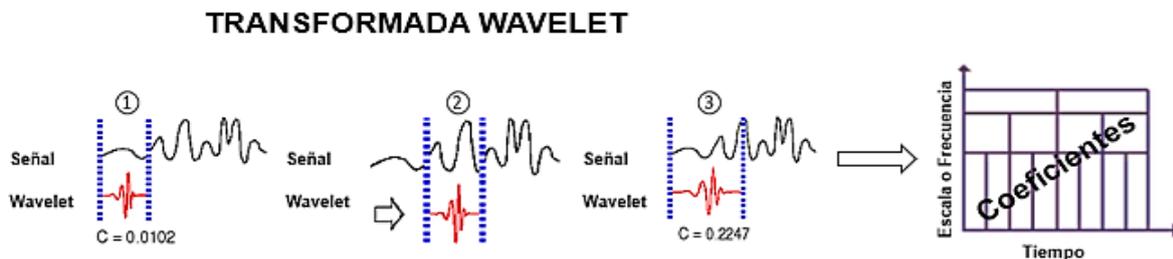


Figura 2. Esquema de la transformación wavelet continua.
Fuente: MathWorks (2016).

1.5.3.1. Proceso de construcción de escalas de wavelets

Como ya se mencionó anteriormente, si escalamos una wavelet en un factor 2, su frecuencia equivalente también se reduce a la mitad o en una octava. La CWT, analiza la señal en escalas intermedias dentro de cada octava, este parámetro se conoce como el número de escalas por octava (N_v), permitiendo un análisis de escala fina. Los valores típicos para este parámetro son 10, 12, 16 y 32 (*Figura 3*). Las escalas mínima y máxima para el análisis se determinan automáticamente mediante la función CWT de acuerdo a la distribución de la energía de la onda.

Escala: 2^1	$2^{11/10}$	$2^{12/10}$	$2^{13/10}$	$2^{14/10}$	$2^{15/10}$	$2^{16/10}$	$2^{17/10}$	$2^{18/10}$	$2^{19/10}$	Escala: 2^2
---------------------------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	---------------------------------

Figura 3. Ejemplo de escalas intermedias dentro de una octava ($N_v=10$).
Fuente: MathWorks (2016).

1.5.3.2. Elección de la wavelet madre

Existen diferentes familias wavelets desarrolladas según el propósito del análisis. Para transformadas discretas se utilizan generalmente las familias Daubechies, Haar, Symlets y Coiflets. Por otra parte, para transformadas continuas se utilizan Gauss, Morlet y Mexican hat (Misiti, 2007).

Comúnmente para estudios de series de tiempo geofísicas se utiliza la familia Morlet, que permite una mejor extracción de las características de una señal al proveer un buen balance entre localización de tiempo y frecuencia. La wavelet Morlet se define según la ecuación (3) (Grinsted et al., 2004).

$$\psi_0(\eta) = \pi^{-1/4} e^{i\omega_0\eta} e^{-\frac{1}{2}\eta^2} \quad (3)$$

Dónde, ω_0 es una frecuencia adimensional, considerada igual a 6 para satisfacer la condición de admisibilidad, y η es el tiempo multiplicado por un factor de escala.

De esta manera, suponiendo que se tiene una serie de tiempo, x_n , con intervalos iguales de tiempo δt y $n=0 \dots N-1$, la transformada continua de x_n es definida como la convolución¹ de x_n con una versión escalada y desplazada de $\psi_0(\eta)$, como se muestra en la ecuación (4).

$$W_n^X(s) = \sqrt{\frac{\delta t}{s}} \sum_{n'=1}^N x_{n'} \psi_0 \left[(n' - n) \frac{\delta t}{s} \right]. \quad (4)$$

Donde δt es el intervalo de tiempo de análisis, s la escala, x_n la serie de tiempo, ψ_0 la wavelet madre determinada (Grinsted et al., 2004).

Finalmente, se puede definir el espectro de potencia wavelet como $|W_n^X(s)|^2$, el mismo que se utiliza para representar la energía contenida en la serie de tiempo.

1.5.3.3. Cono de Influencia

Debido a que las series de tiempo son de longitud finita, se producen errores al principio y al final de la transformada. Para solucionar este problema, se introduce el cono de influencia (COI, por sus siglas en inglés), donde los resultados fuera o cerca de los límites del cono

¹ *Convolución* se refiere a la transformación de dos funciones en una tercera función que representa la magnitud en la que se superponen la primera función y una versión trasladada de la segunda función.

deben tratarse cuidadosamente debido a que los efectos de borde se vuelven importantes en esta región, siendo necesario analizar si los datos obtenidos son producto de la casualidad o de un verdadero cambio en la varianza de las series (causalidad) (Torrence & Compo, 1998).

1.5.3.4. Nivel de significación

Para calcular la significancia estadística del espectro de poder wavelet, se utiliza el método propuesto por Torrence & Compo (1998), el cual consiste básicamente en generar un espectro aleatorio de fondo y comparar con el espectro de la serie de tiempo. La hipótesis nula es: la señal de la serie de tiempo se genera mediante un proceso estacionario con un espectro de potencia de fondo. Para este método se utiliza un significativo al nivel del 5%, que es equivalente a un nivel de confianza del 95%.

Si se desea analizar la similitud entre dos espectros wavelet, es difícil e impreciso únicamente comparar la potencia wavelet de cada uno por separado; es por eso que se han desarrollado procedimientos como la transformada wavelet cruzada y a partir de esta la coherencia wavelet.

1.5.4. Transformada Wavelet Cruzada

Identifica las áreas en común con alta energía entre las series. Su principio básico es el siguiente:

Suponiendo que $W_n^X(s)$ y $W_n^Y(s)$, son transformadas wavelets continuas de dos series de tiempo: $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ y $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$, la transformada wavelet cruzada entre ellos sería $W_n^{XY}(s) = W_n^X(s)W_n^{Y*}(s)$, donde $W_n^{Y*}(s)$ representa el complejo conjugado de $W_n^Y(s)$ y s es la escala (Lin et al., 2017).

1.5.4.1. Coherencia Wavelet

Es un procedimiento para analizar las bandas de frecuencias asociadas entre sí de dos series de tiempo, es el equivalente a realizar un análisis de correlación, con lo cual se identifica los periodos con ciclos semejantes, aunque la potencia común sea baja. La coherencia Wavelet mide la covarianza entre las series X e Y , en el plano tiempo-frecuencia, utilizando como base otro procedimiento derivado conocido como espectro de poder wavelet cruzado o transformada wavelet cruzada. En este estudio se utilizará este procedimiento, descrito más ampliamente en la sección de metodología.

CAPÍTULO II

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

La investigación se llevó a cabo en las cuencas de los ríos Tomebamba y Machángara, según indica la *Figura 4*.

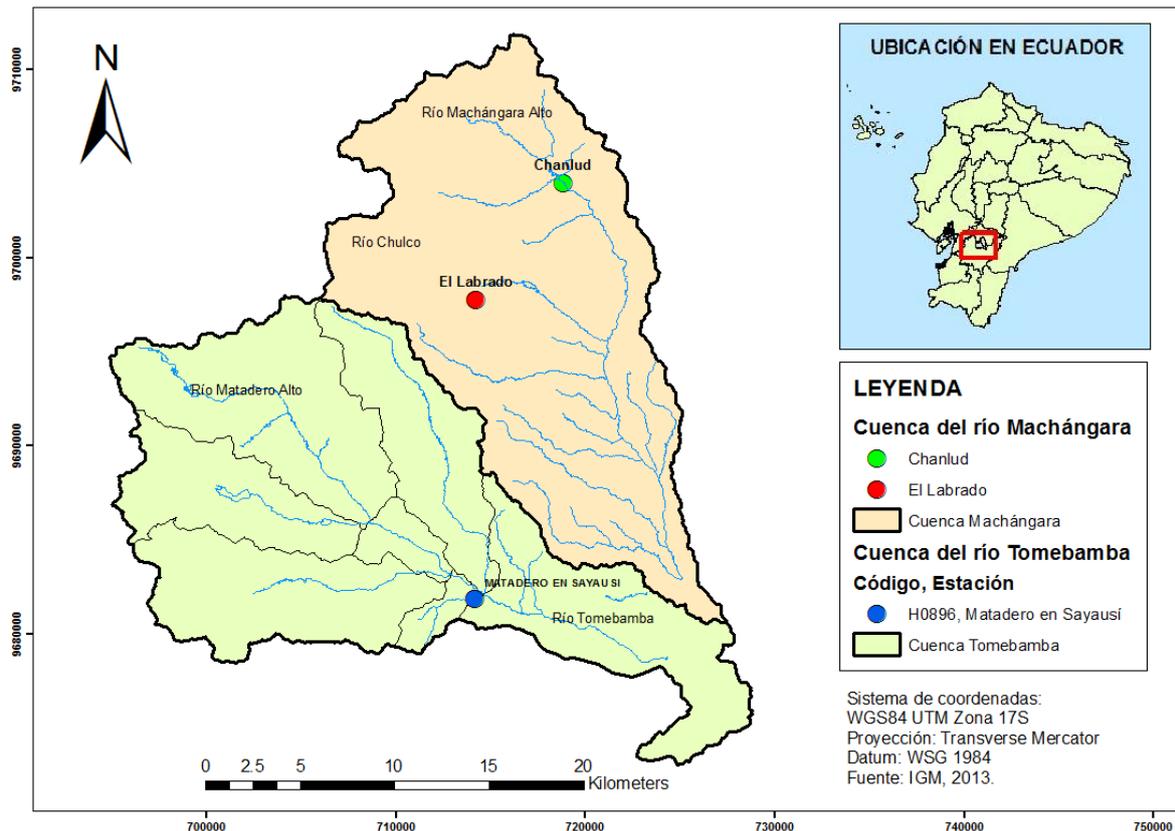


Figura 4. Mapa de localización de las cuencas en estudio.
Fuente: IGM, 2013.

2.1.1. Descripción cuenca del río Machángara

La cuenca del río Machángara se ubica geográficamente entre las provincias de Azuay y Cañar, pertenece al sistema hidrográfico del río Santiago. Cuenta con una extensión de 355 km², y se divide en tres subcuencas: Machángara alto, Chulco y Machángara bajo. Es de gran importancia por su aporte al abastecimiento de agua para agricultura y ganadería en varias parroquias del Azuay, y por la generación de energía hidroeléctrica en las plantas generadoras de Saucay y Saymirín. Para el presente estudio se utilizaron los datos de caudales de entrada de las represas El Labrado y Chanlud, ubicadas en la microcuenca Chulco y Machángara alto respectivamente, donde se almacenan más de 22 millones de metros cúbicos de agua del Río Machángara y sus afluentes (Zhiña Villa, 2016).

2.1.2. Descripción cuenca del río Tomebamba

Se ubica en la provincia del Azuay y tiene una extensión de 383 km², al igual que la cuenca del Machángara pertenece al sistema hidrográfico del río Santiago. Está conformada por siete microcuencas: Río Culebrillas, Río Llaviuco, Río Matadero alto y bajo, Río Mazán, Río Pinchishana y Río Tomebamba. Dentro de sus límites, se encuentra parte del Parque Nacional Cajas, por lo tanto, en las microcuencas más elevadas, se puede encontrar una zona de transición entre bosques de alta montaña tropical y páramos (Rincón, Merchán, Sparer, Rojas, & Zarate, 2017). Esta cuenca brinda servicios ambientales, entre ellos la dotación de agua potable y riego, se conoce que el río Tomebamba alimenta el canal de riego que abastece a la parroquia San Joaquín, de igual manera dentro de la cuenca opera la planta de agua potable el Cebollar que abastece a aproximadamente al 40% de la población del área urbana del cantón Cuenca y otras plantas con menor capacidad instalada que de la misma manera contribuyen a la dotación del líquido vital (Rojas & Melchor, 2016). De esta área se consideró una estación perteneciente al INAMHI, denominada Matadero en Sayausí, con código H0896.

2.2. Fuente de variables

2.2.1. Índice de caudales estandarizado (SSI)

Los puntos de fuente de información se escogieron de acuerdo a los siguientes criterios: estaciones que tengan un registro continuo de información de al menos treinta años, según las recomendaciones de la Organización Meteorológica Mundial (OMM), con menos del 10% de datos ausentes en la serie temporal. De esta manera se seleccionó una estación perteneciente al INAMHI para la cuenca del río Tomebamba, misma que será analizada durante un periodo de 41 años desde 1968 hasta 2008, y dos registros de caudales de entrada a los embalses de la cuenca del río Machángara, durante un periodo de 46 años, desde 1965 hasta 2010, los detalles se muestran en la *Tabla 2*.

Tabla 2. Datos de estaciones pertenecientes a las cuencas Tomebamba y Machángara.

Cuenca	Código	Estación	Latitud	Longitud	Altitud
Río Machángara		Chanlud (Represa)	2°67'57" S	79° 03' 13" W	3485
		Labrado (Represa)	2°43'58" S	79°00'59" W	3335
Río Tomebamba	H0896	Matadero en Sayausí	2° 52' 31" S	79° 04' 01" W	2602

Fuente: Zhiña Villa (2016) y Rojas & Melchor (2016).



2.2.2. Índice de condición de la vegetación (VCI)

Para calcular el VCI se necesita previamente el Índice de Vegetación Mejorada (EVI), obtenido del sensor MODIS13Q1 a través de la Aplicación para Extracción y Exploración de Muestras Preparadas para el Análisis (AppEEARS) desarrollada por el Servicio Geológico de los Estados Unidos o USGS por sus siglas en inglés; por la disponibilidad de datos, el periodo de análisis se estableció del año 2000 a 2010, el valor del índice se registra cada 16 días con una resolución espacial de 250m.

También se utiliza la capa de Garantía de Calidad de Confiabilidad de Píxeles (QR), para comprobar la calidad de los píxeles y enmascarar aquellos con interferencias que pueden alterar el valor del VCI, estos datos los proporciona el sensor MODIS13Q1 y se descargan de la AppEEARS.

2.2.3. Índices climáticos a escala global

Se utilizaron los principales índices asociados a los océanos Pacíficos y Atlántico: BEST, ESPI, MEI, NAO, Niño1+2, Niño 3, Niño 4, Niño 3.4, ONI, PDO, PNA, QBO, SOI, TNA, TNI, TSA. Los datos fueron obtenidos del sitio web de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA).

2.3. Metodología

En primer lugar, se realizó un análisis estadístico preliminar de las series de datos de caudales correspondiente a cada estación, con el objetivo de identificar anomalías que pueden alterar los resultados. Luego se investigó las características espacio-temporales de los eventos de sequía hidrológica y vegetación, para lo cual se utilizó un índice estandarizado de sequía de caudales (SSI) y el índice de condición de la vegetación (VCI), mismos que permiten identificar factores como: (a) Duración, (b) Severidad (intensidad) y (c) Inicio o finalización de un evento seco. Posteriormente, se realizó una correlación cruzada del VCI con el SSI, para determinar la relación de la sequía hidrológica en la composición, estructura y función de los ecosistemas vegetales. Finalmente, para conocer la respuesta de la sequía y vegetación a factores climáticos a gran escala, se estudió la correlación entre el SSI, VCI y los principales índices climáticos globales, a través de la técnica de la Transformada de Wavelet (WT), específicamente el método denominado Coherencia Wavelet.

2.3.1. Análisis estadístico

Para comprobar la calidad de la base de datos de caudales, se examinaron las series inicialmente mediante un análisis exploratorio de datos. Para lo cual, se empleó la prueba estadística de Grubbs, para detectar valores atípicos con un nivel de confianza del 99%. El análisis se realizó en el software R Studio versión 3.4.0. Posterior, se realizó un análisis de tendencia mediante el test de Mann-Kendall, para ello se utilizó el paquete estadístico XLSTAT y se consideró un nivel de significancia de 5%.

Para el cálculo del SSI, una vez agrupados los datos, se identificó de entre seis distribuciones de probabilidad (Gamma, Weibull, Normal, Logística, Log-normal y Chi cuadrado,), la de mejor ajuste, utilizando los siguientes test de bondad: Test de Kolmogorov-Smirnov (K-S Test), el Criterio de Información de Akaike (AIC) y el estadístico de Anderson-Darling (AD).

Para establecer las relaciones entre variables, se utilizaron los métodos de correlación cruzada y coherencia wavelet, para ambos, se estableció un nivel de significación del 5%. Este análisis se realizó en el software Matlab versión 10.5.

2.3.1.1. Tratamiento de datos de caudales

El primer paso antes de proceder con las metodologías, fue verificar la calidad de las bases de datos obtenidas. Se empleó, en primer lugar, un análisis exploratorio de datos, utilizando la prueba estadística de Grubbs (Grubbs, 1969), que permite identificar los valores atípicos de la serie temporal para un nivel de confianza de 99%, las hipótesis probadas son:

- Hipótesis nula (H_0): No hay valores atípicos en los datos
- Hipótesis alterna (H_1): El valor mínimo o máximo es un valor atípico

Posterior a la determinación de valores atípicos, se realizó un análisis estadístico para evaluar la homogeneidad de los datos, mediante la Prueba Mann-Kendall, esta prueba es la más utilizada para analizar series de datos hidrológicos (Curi Tapahuasco, 2017), las hipótesis evaluadas son:

- H_0 (Hipótesis Nula): No existe una tendencia en la serie analizada
- H_1 (Hipótesis Alternativa): Hay una tendencia en la serie

Una vez realizado el análisis inicial de datos, se procedió al cálculo del índice de sequía.

2.3.2. Cálculo del Índice estandarizado de sequía de caudales (SSI)

Para caracterizar la sequía hidrológica, se calculó el índice estandarizado de caudales en múltiples escalas de tiempo (1, 3, 6 y 12 meses). El procedimiento es el siguiente:

2.3.2.1. Agrupación de los datos

De acuerdo a la escala de análisis se procede a agrupar los datos mensuales de caudal, por ejemplo, para calcular el índice en escala trimestral, para cada mes del año y cada estación, se calcula el valor acumulado de la suma del mes en análisis y los dos meses anteriores. De esta manera se agruparon los datos para el análisis mensual (SSI 1), trimestral (SSI 3), semestral (SSI 6) y anual (SSI 12).

2.3.2.2. Distribuciones de probabilidad y test de bondad de ajuste

Una vez agrupados los datos, se procede a filtrarlos por meses durante el periodo de análisis, de esta manera se obtienen 12 series (enero a diciembre) cuya longitud depende del periodo de análisis, posteriormente se aplican diferentes distribuciones de probabilidad en cada serie, en este caso se escogieron las distribuciones Gamma, Weibull, Normal, Logística, Log-normal y Chi cuadrado, que son ampliamente utilizadas en estudios hidrológicos (Zhiña Villa, 2016). Cada una de ellas se evaluó mediante test estadísticos de bondad de ajuste: Test de Kolmogorov-Smirnov (K-S Test), el Criterio de Información de Akaike (AIC) y el estadístico de Anderson-Darling (AD), para escoger la distribución que describa mejor el comportamiento mensual interanual, seleccionando aquella cuyo p-valor del K-S Test sea mayor 0.05 y con el valor de AIC y AD más bajo (Rivera & Penalba, 2018).

La distribución teórica que mejor represente el comportamiento de los caudales analizados, se transforma a una distribución normal con una media de 0 y desviación de 1. Los valores obtenidos corresponden al índice de sequía de caudal estandarizado y se analizan de acuerdo a la siguiente clasificación (*Tabla 3*).

Tabla 3. Clasificación de sequía hidrológica según SSI.

Categoría	Valor SSI
Sequía Extrema	$(-\infty, -2)$
Sequía Severa	$[-2, -1.5)$
Sequía Moderada	$[-1.5, -1)$
Sequía Suave	$[-1, 0)$
Normal	$[0, +\infty)$

Fuente: Vicente-Serrano. et al. (2012).

Con base en estos valores, se establecen los umbrales (nivel de truncamiento) que permite caracterizar la sequía de acuerdo a la duración, intensidad y magnitud. Para la definición de

dichos términos, se consideró como ejemplo la *Figura 5*, recopilada de Curi Tapahuasco, (2017).

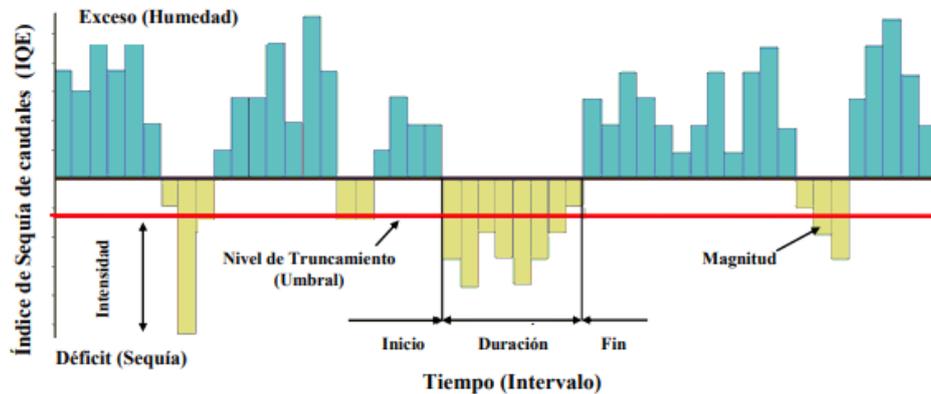


Figura 5. Esquema para la identificación y caracterización de las sequías hidrológicas.
Fuente: Curi Tapahuasco (2017).

- Duración de un evento de sequía*: corresponde al número de meses consecutivos con un valor SSI inferior al umbral (-1, correspondiente a *sequía moderada*).
- Magnitud*: es la sumatoria de déficit a partir del umbral durante un evento de sequía.
- Intensidad*: mide la severidad de un evento de sequía, se puede cuantificar de dos maneras, la primera denominada intensidad máxima, definida por la máxima desviación con respecto al nivel de truncamiento y la segunda, la intensidad promedio que representa la división entre la magnitud y duración de un evento seco.

2.1.1. Cálculo del Índice de Condición de la Vegetación (VCI)

Para calcular este índice es necesario primero obtener los valores del índice de vegetación mejorado EVI (Enhanced Vegetation Index), que se cuantifica mediante la ecuación (5).

$$EVI = G \frac{NIR - VIS}{NIR + C_1 VIS - C_2 BLU + L} \quad (5)$$

Dónde,

- *NIR*: cantidad de longitud de onda infrarroja reflejada.
- *VIS*: longitud de onda visible reflejada.
- C_1 y C_2 : coeficientes desarrollados para corregir los efectos negativos de la dispersión y aerosoles, siendo sus valores 6 y 7,5 respectivamente.
- *G*: factor de cambio equivalente a 2.5.
- *L*: igual a 1, representa al ajuste de la señal antecedente del dosel de la vegetación
- *BLU*: banda azul para corregir el efecto de los aerosoles en la banda roja.

Este índice se descargó de la AppEARS, obteniendo un conjunto de imágenes tomadas cada 16 días durante el periodo del 2000 al 2010 (Dutta et al., 2015). Además, se descargó

la capa de Garantía de Calidad de Confiabilidad de Píxeles, proporcionado por el mismo sensor, con la finalidad de enmascarar los píxeles afectados por interferencias atmosféricas (ej., nubes, hielo, nieve). Esta capa permite clasificar y considerar para el análisis únicamente los píxeles que cumplen con un criterio de calidad suficiente.

Una vez obtenido el índice EVI y la capa de Confiabilidad de Píxeles, se procedió a realizar el cálculo del VCI utilizando el software libre R-Studio y ArcGIS 10.5. El principio básico para el cálculo consiste en comparar el valor actual del índice anteriormente calculado con los valores observados en el mismo periodo en años anteriores dentro de un píxel específico, la ecuación se muestra a continuación.

$$VCI_{i,j,k} = \frac{EVI_{i,j,k} - EVI_{i,min}}{EVI_{i,max} - EVI_{i,min}} * 100 \quad (6)$$

Dónde,

- $VCI_{i,j,k}$, valor del índice dentro del píxel i , durante el periodo de análisis j (cada 16 días según el sensor MODIS), para el año k .
- $EVI_{i,j,k}$, valor del índice EVI para el píxel i , periodo j y año k .
- $EVI_{i,min}$ y $EVI_{i,max}$, valor mínimo y máximo del índice EVI, evaluado durante varios años (periodo total de análisis), para el píxel i .

El valor del VCI se mide en porcentaje (0-100), los más bajos y más altos indican un estado de vegetación mala y buena, respectivamente. Según Kogan (1995) se clasifican de acuerdo a los rangos que se indican en la *Tabla 4*.

Tabla 4. Clasificación del VCI.

Porcentaje (%)	Clasificación
40-100	Sin sequía
30-40	Sequía leve
20-30	Sequía moderada
10-20	Sequía severa
0-10	Sequía extrema

Fuente: Kogan (1995).

2.1.2. Método de correlación cruzada de series de tiempo

Permite relacionar dos series temporales, en tiempo simultáneo y con un desfase de tiempo (lag), para resaltar asociaciones que no se identifican con una simple correlación lineal. Para realizar una correlación cruzada, se requiere previamente que las series utilizadas sean estacionarias o estén cointegradas. De esta manera se descarta la posibilidad de

obtener resultados erróneos causados por la tendencia o por autocorrelación en las series. Una serie estacionaria, se identifica cuando su media y varianza no se modifican estadísticamente con el tiempo, es decir, los datos son independientes; sin embargo, pueden existir series no estacionarias pero que están cointegradas, lo que significa que entre ambas series existe una combinación lineal que sí es estacionaria, dicha combinación hace referencia a que los residuales de la regresión entre las series analizadas, sea estacionarios (Guevara, 2014).

Para comprobar la estacionariedad, se utilizan autocorrelogramas, que detectan que una serie es no estacionaria cuando sus coeficientes de autocorrelación son elevados en diferentes lags, mientras que, si es estacionaria, estos coeficientes decrecen rápido de manera exponencial hasta alcanzar un valor de cero. En caso de obtener que las series originales son no estacionarias, se procede a comprobar la cointegración, realizando de igual forma autocorrelogramas, pero con los residuales de la regresión entre las series (Guevara, 2014).

Si los resultados de los procedimientos anteriores, indican que las series son no estacionarias, se procede a transformar las series originales a series de diferencias de valores sucesivos, mediante la transformación de las primeras diferencias, obteniendo DX_t o DY_t , a través de la siguiente ecuación (7):

$$DX_t = (X_t - X_{t-1}) \quad y \quad DY_t = (Y_t - Y_{t-1}) \quad (7)$$

Donde X_t y Y_t , representan un valor de la variable en el tiempo t , X_{t-1} y Y_{t-1} es el valor de la variable X o Y en el tiempo anterior. Con estas nuevas series se procede a calcular nuevamente la estacionariedad. En caso de ser no estacionarias, se realiza nuevamente las transformaciones sobre las series DX_t , DY_t (Guevara, 2014).

La correlación cruzada para un retado (lag) positivo se obtiene mediante:

$$r_{XY(k)} = \frac{\sum[(X_t - u_x) * (Y_{t+k} - u_y)]}{NS_x S_y} = \frac{1}{N} \sum \left[\left(\frac{X_t - u_x}{S_x} \right) * \left(\frac{Y_{t+k} - u_y}{S_y} \right) \right] \quad \text{en lag} + \quad (8)$$

Y para un desfase negativo:

$$r_{XY(-k)} = \frac{\sum[(Y_t - u_y) * (X_{t+k} - u_x)]}{NS_x S_y} = \frac{1}{N} \sum \left[\left(\frac{Y_t - u_y}{S_y} \right) * \left(\frac{X_{t+k} - u_x}{S_x} \right) \right] \quad \text{en lag} - \quad (9)$$

Dónde, X_t es el dato de la serie independiente en el tiempo t , X_{t+k} dato de la serie independiente en el tiempo k , Y_t es el dato de la serie dependiente en el tiempo t , Y_{t+k} dato de la serie dependiente en el tiempo k , S_x y S_y son la desviación estándar para X y Y respectivamente, N número de pares de datos a correlacionar, u_x y u_y son las medias de las series X y Y , k retardo (lag). N , S_x , S_y , u_x y u_y corresponden a la serie sin retrasos (lag 0) y se mantienen constantes durante el análisis. El coeficiente de correlación es estadísticamente significativo, al 95% de confianza si:

$$r_{xy}(k) > 1.96 * \frac{1}{\sqrt{(N-k)}} \quad (10)$$

Dónde, k es el valor absoluto del lag utilizado, N es el número de datos y $1/\sqrt{(N-k)}$ es el error estándar de $r_{xy}(k)$ (Guevara, 2014).

2.1.3. Método de Coherencia Wavelet (CW)

Para establecer si dos series de tiempo se relacionan de alguna manera, dentro del análisis wavelet se ha desarrollado un coeficiente de correlación localizado en el espacio tiempo-frecuencia denominado coherencia wavelet, que se define como (Grinsted et al., 2004):

$$R_n^2(s) = \frac{|S(s^{-1} W_n^{XY}(s))|^2}{S(s^{-1} |W_n^X(s)|^2) \cdot S(s^{-1} |W_n^Y(s)|^2)}, \quad (11)$$

Donde R^2 , representa la coherencia cuadrática, mientras más cercano a 1, denota una mayor correlación, S es un operador de suavizado que depende de la familia wavelet utilizada y $W_n^{XY}(s)$, es el espectro wavelet cruzado. Los cálculos se realizaron en el software Matlab.

2.1.4. Nivel de significación

Para la estimación del nivel de significación estadística de la coherencia wavelet, se utiliza un método desarrollado por Grinsted et al. (2004), basado en la simulación de Monte Carlo. Para lo cual se genera mediante un proceso autorregresivo (AR1), un conjunto de datos sustitutos para cada serie de tiempo de entrada. Posteriormente se forman pares de conjuntos de datos sustitutos entre ambas series y para cada par se calcula la coherencia wavelet. Luego, se estima el nivel de significación para cada escala utilizando solo valores fuera del COI. La estimación de Monte Carlo del nivel de significación requiere del orden de 1000 pares de conjuntos de datos sustitutos.

CAPÍTULO III

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los métodos de investigación expuestos se emplearon para caracterizar las sequías hidrológica y agrícola de las áreas en estudio, y analizar las respectivas correlaciones entre sí, y con los factores climáticos a gran escala, representados a través de índices climáticos.

3.1. Tratamiento de datos

3.1.1. Análisis exploratorio de las series de caudales-Prueba estadística de Grubbs

Se utilizó la prueba estadística de Grubbs con la finalidad de detectar valores atípicos (outliers) dentro de las tres series de caudales analizadas, los resultados del test se graficaron para una mejor comprensión. La *Figura 6*, corresponde a la serie de datos de la represa Chanlud, dentro de la microcuenca Machángara alto, se puede observar que la hipótesis nula es aceptada; es decir, no existe outliers para un nivel de significancia del 99%, los datos no sobrepasan los umbrales superior e inferior definidos por el método utilizado, los mismos resultados se obtuvieron para la serie de datos de El Labrado. Por otra parte, para la estación Matadero en Sayausí, perteneciente al río Tomebamba, se detecta la presencia de un valor atípico correspondiente al mes de junio del año 2007 (*Figura 7*); sin embargo, en esa fecha según revisiones bibliográficas, sí se registró una crecida del río Tomebamba (Llerena & Carolina, 2014), por este motivo se acepta la hipótesis nula, descartando el valor como atípico, los resultados se resumen en la *Tabla 5*.

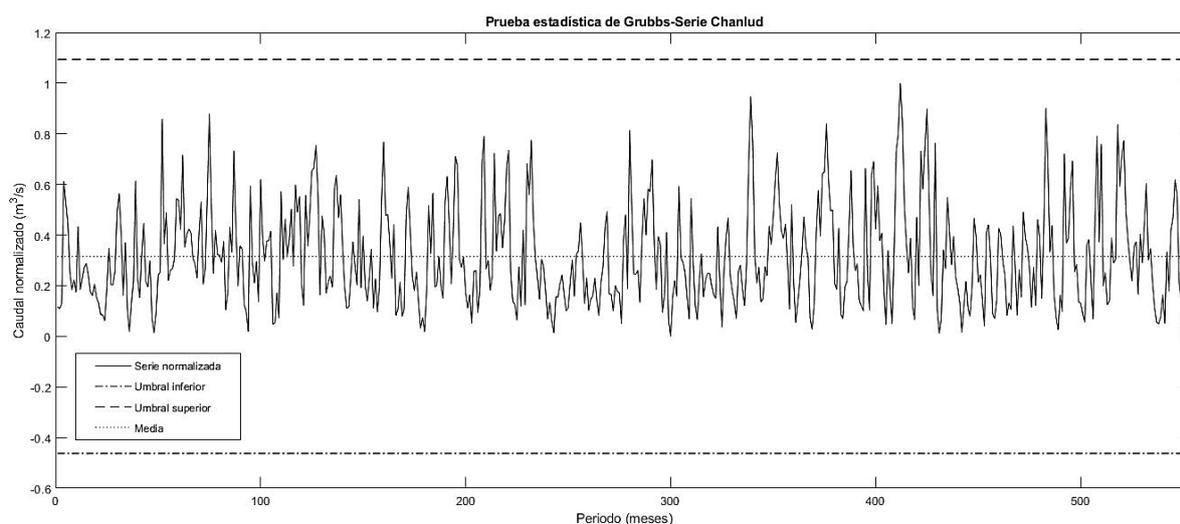


Figura 6. Prueba estadística de Grubbs para la serie temporal Chanlud.

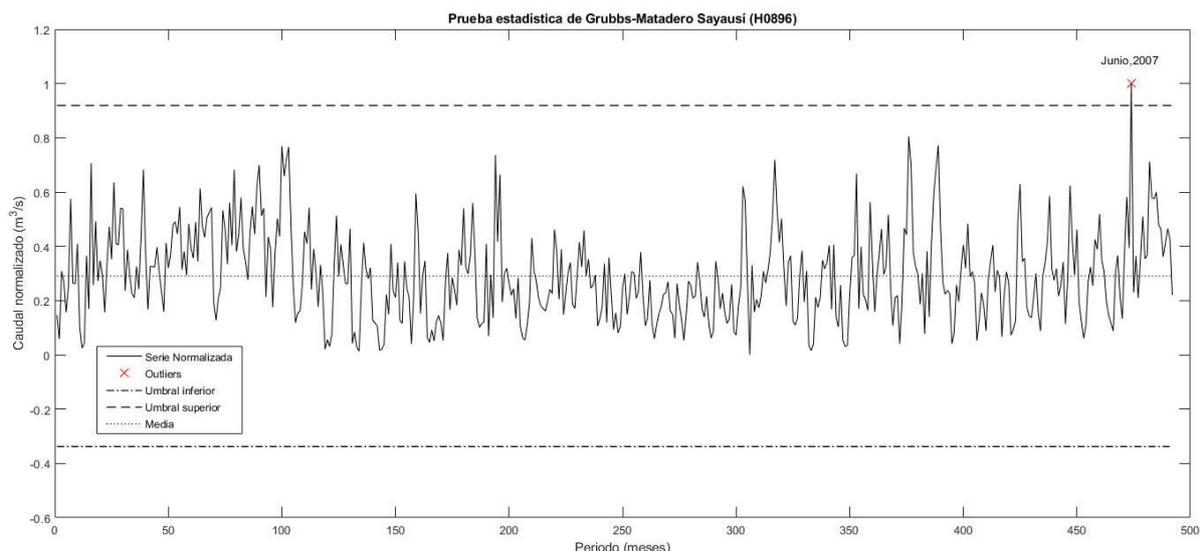


Figura 7. Prueba estadística de Grubbs para la serie temporal Matadero en Sayausí.

3.1.2. Análisis de tendencia mediante la prueba Mann Kendall

La *Tabla 5* muestra los resultados de la prueba Mann Kendall para un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$, donde se observa que en todas las estaciones analizadas se acepta la hipótesis nula (H_0), puesto que el p-valor calculado es mayor que el nivel de significación establecido, consecuentemente se concluye que las series temporales no presentan tendencia.

Tabla 5. Resumen de resultados del tratamiento de datos.

Datos		Prueba Grubbs	Prueba Mann Kendall	
Chanlud	H0: Sin Outliers		p-valor= 0.921	H0: No hay tendencia
El Labrado	H0: Sin Outliers		p-valor= 0.944	H0: No hay tendencia
Matadero en Sayausí (H0896)	H1: Un outliers-junio, 2007 El valor corresponde a una fecha en el cual se registró una crecida del río Tomebamba, por ende, se descarta el valor como atípico.		p-valor= 0.409	H0: No hay tendencia

3.2. Caracterización de la sequía hidrológica según el SSI.

Se calculó el índice de sequía de caudal estandarizado (SSI) con datos mensuales con un nivel de agrupamiento mensual, trimestral, semestral y anual, obteniendo los siguientes resultados:

3.2.1. Selección de la distribución de probabilidad

Se evaluaron las distribuciones de probabilidad Gamma, Weibull, Normal, Logística, Log-normal y Chi-cuadrado, y de acuerdo a las pruebas de bondad de ajuste: Test de Kolmogorov-Smirnov (K-S Test), Criterio de Información de Akaike (AIC) y Criterio de Información Bayesiano (BIC), se seleccionaron las de mejor ajuste para cada mes, estación y nivel de agrupamiento. Los resultados se muestran en la *Tabla 6*.

Tabla 6. Distribuciones de probabilidad con mejor ajuste para cada mes para el SSI.

Estación	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
SSI 1 (mensual)												
Chanlud	LN	GM	LN	WB	LN	GM	LN	LN	LN	GM	GM	WB
Labrado	GM	WB	WB	WB	LN	GM	LN	LN	LN	WB	WB	WB
Matadero en Sayausí	WB	WB	WB	WB	LN	LN	GM	WB	WB	WB	WB	WB
SSI 3 (trimestral)												
Chanlud	GM	LN	WB	WB	N	GM	LN	LN	LN	GM	GM	WB
Labrado	GM	LN	GM	GM	N	GM	LN	LN	LN	WB	GM	WB
Matadero en Sayausí	WB	WB	WB	WB	N	LN	LN	GM	GM	WB	GM	WB
SSI 6 (semestral)												
Chanlud	GM	LN	LN	WB	GM	GM	GM	GM	LN	LN	LN	GM
Labrado	LN	GM	LN	LN	LN	GM						
Matadero en Sayausí	GM	GM	WB	WB	WB	GM	GM	GM	LN	LN	LN	GM
SSI 12 (anual)												
Chanlud	CH	CH	CH	WB	CH							
Labrado	GM	GM	WB	WB	GM	GM	GM	LN	GM	GM	GM	GM
Matadero en Sayausí	LN											

Dónde: GM: Gamma, WB: Weibull, N: Normal, L: Logística, LN: Log-normal, CH: Chi cuadrado.

3.2.2. Obtención del Índice Estandarizado de Sequía Hidrológica (SSI)

Una vez seleccionada la distribución con mejor ajuste, se procedió a realizar la normalización, con lo cual se generó el valor del índice. El análisis de la duración e intensidad que caracterizan los eventos de sequía, se lo realizó a partir de los umbrales establecidos. Para la cuenca del río Machángara, los resultados de la evolución en el tiempo del SSI a diferentes escalas, correspondientes a la estación Chanlud y El Labrado, se grafican en la *Figura 8* y *9* respectivamente. Para la cuenca del río Tomebamba se muestra en la *Figura 10*.

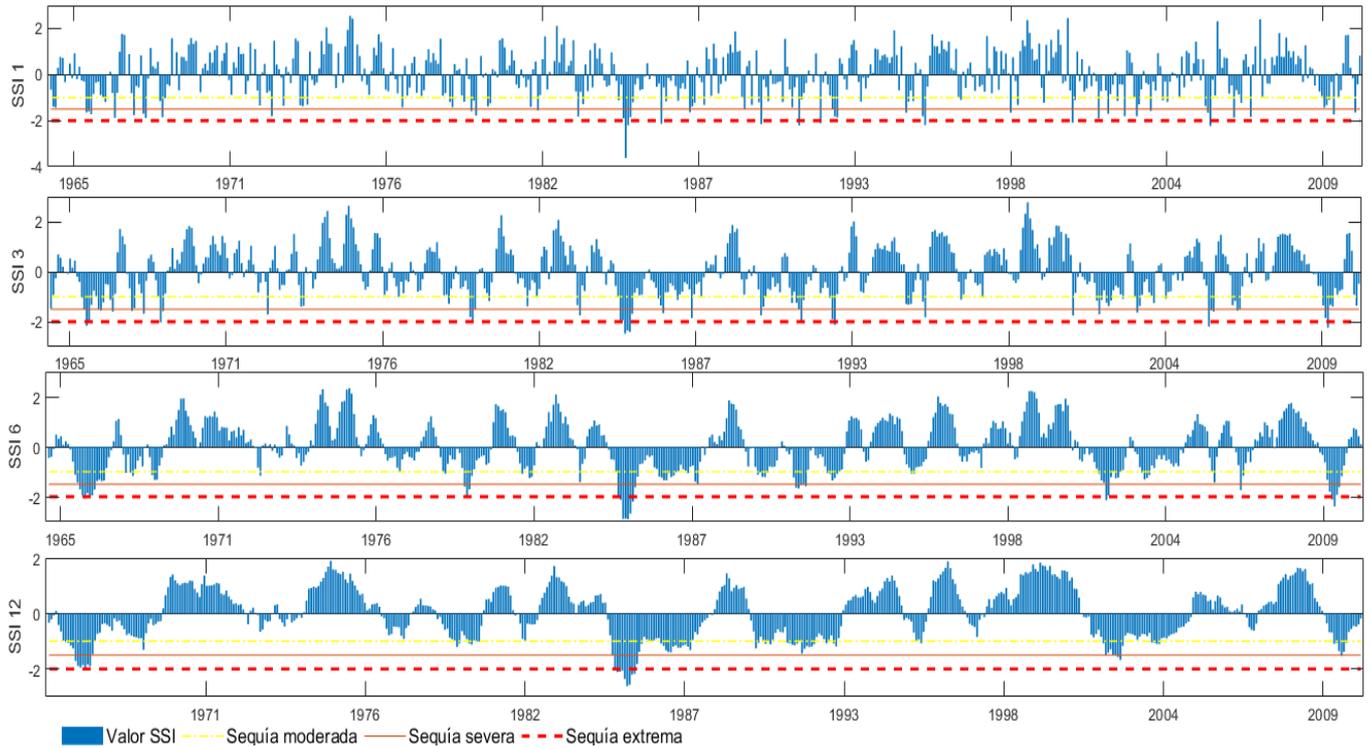


Figura 8. Evolución temporal del SSI a escala mensual, trimestral, semestral y anual. Chanlud, cuenca del río Machángara.

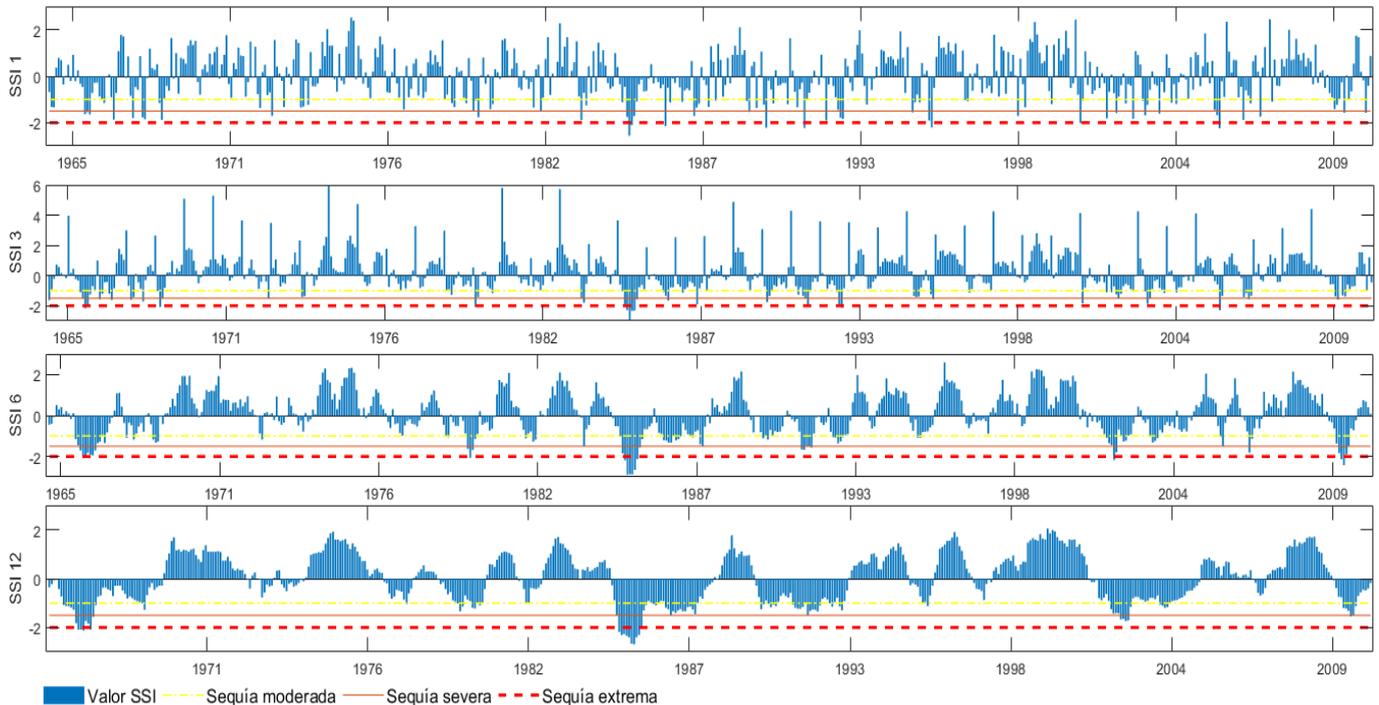


Figura 9. Evolución temporal del SSI a escala mensual, trimestral, semestral y anual. El Labrado, cuenca del río Machángara.

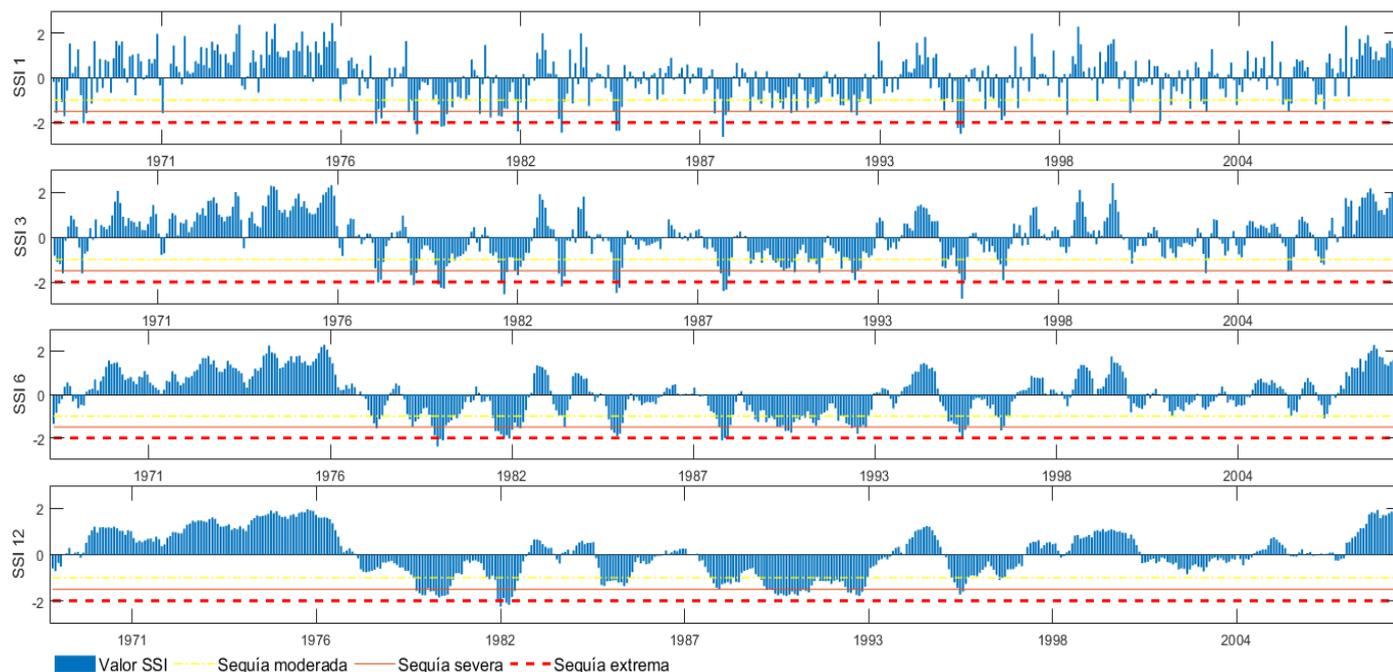


Figura 10. Evolución temporal del SSI a escala mensual, trimestral, semestral y anual. Matadero en Sayausí, cuenca del río Tomebamba.

3.2.3. Duración, Intensidad y Magnitud

3.2.3.1. Duración

La caracterización de este factor se realizó considerando los umbrales. A partir de valores menores o iguales a -1, se define el inicio del evento de una sequía el cual culmina al alcanzar nuevamente valores mayores a -1.

En el *Figura 11* se muestran las duraciones de los principales eventos secos registrados en la estación Chanlud, para el SSI 1, durante el periodo de 1965-2010. El evento de sequía de mayor duración ocurrió a inicios de 1985, con una duración de 5 meses desde febrero hasta junio, generándose dos meses de sequía extrema en marzo y abril. Se registraron varios eventos de duración trimestral: abril a junio del 1966, noviembre de 1968 a enero 1969, octubre a diciembre de 1979, junio a agosto de 1987, junio a agosto de 1992, enero a marzo del 2003, julio hasta septiembre del 2005 (sequía moderada, severa y extrema), y desde septiembre a noviembre del 2009. Se reconocieron también seis eventos de sequía extrema de duración mensual. Se analizó en la misma escala de tiempo los resultados del SSI para la estación El Labrado y se identificó que la mayoría de los eventos de sequía coinciden con la estación Chanlud con una duración similar.

En cuanto a la estación del río Tomebamba (*Figura 12*) se identificó que los eventos de mayor duración son de 4 meses, entre ellos los registrados desde noviembre de 1977 a

febrero de 1978, noviembre de 1978 a febrero de 1979, octubre de 1979 a enero de 1980, agosto a noviembre de 1981, febrero a mayo de 1985.

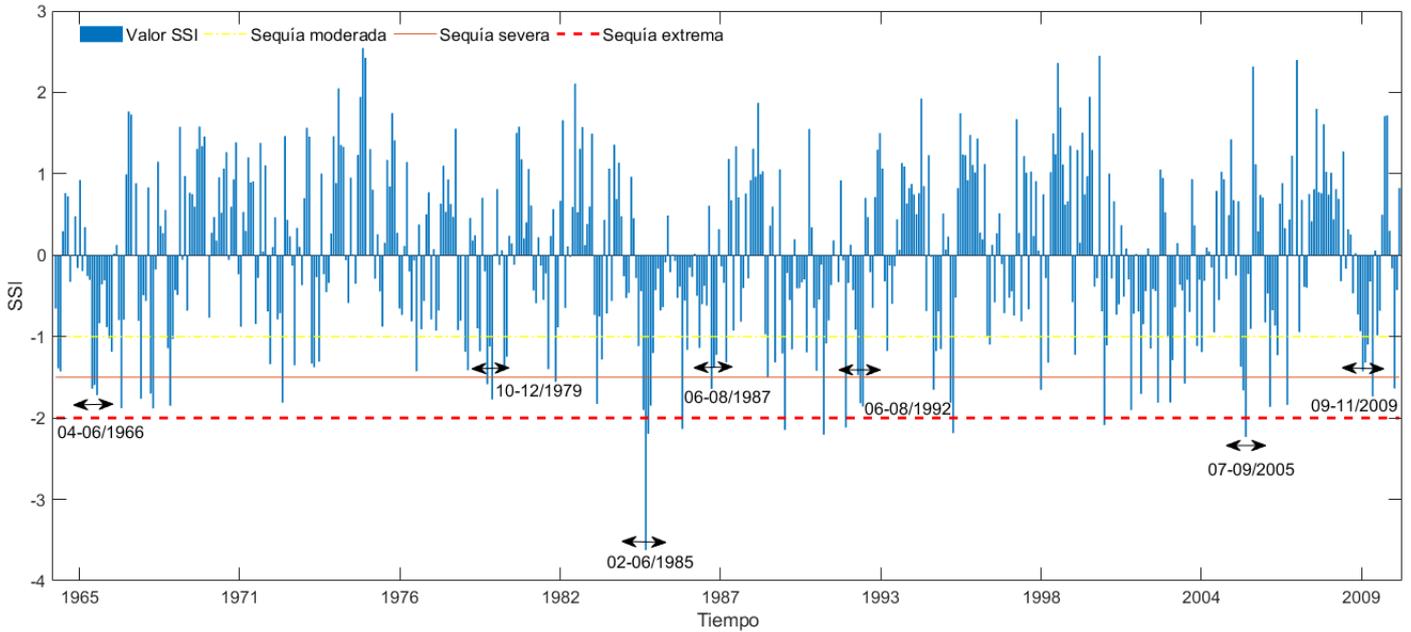


Figura 11. Evolución temporal del SSI 1, con la duración de los principales eventos de sequía. Chanlud, cuenca del río Machángara.

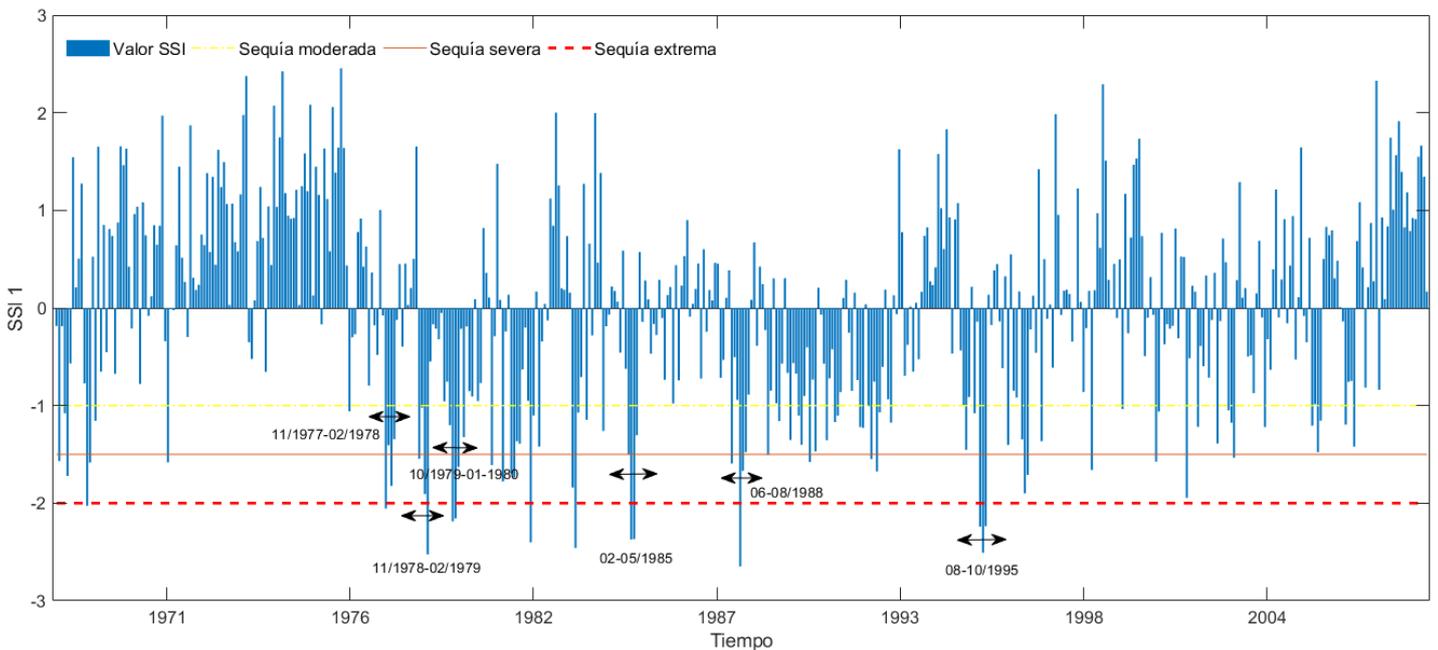


Figura 12. Evolución temporal del SSI 1, con la duración de los principales eventos de sequía. Matadero en Sayausí, cuenca del río Tomebamba.

En la *Tabla 7* se sintetizan los resultados con los periodos de máxima duración de los eventos de sequía en las tres estaciones analizadas para cada SSI.

Tabla 7. Eventos de sequía de mayor duración para las cuencas del río Machángara y Tomebamba.

Estación	Duración máxima		
	N°. meses	Inicio	Finalización
SSI mensual			
Chanlud	5	Feb 1985	Jun 1985
Labrado	5	Feb 1985	Jun 1985
	4	Nov 1977	Feb 1978
	4	Nov 1978	Feb 1979
	4	Oct 1979	Ene 1980
Matadero en Sayausí	4	Ago. 1981	Nov 1981
	4	Feb 1985	Mayo 1985
	SSI trimestral		
Chanlud	7	Ene 1985	Jul 1985
Labrado	7	Ene 1985	Jul 1985
Matadero en Sayausí	9	Ene 1990	Sept 1990
SSI semestral			
Chanlud	13	Mayo 1966	Mayo 1967
Labrado	11	Mayo 1966	Mar 1967
Matadero en Sayausí	13	Dic 1989	Dic 1990
SSI anual			
	13	Jul 1966	Jul 1967
Chanlud	13	Abr 1985	Abr 1986
	13	Dic 1986	Dic 1987
	14	Jun 1966	Jul 1967
Matadero en Sayausí	20	Ene 1990	Ago. 1991

Según los resultados, las duraciones máximas de los eventos de sequía se muestran al agregar los caudales anualmente, es decir, con el SSI 12, siendo la duración máxima la observada en la estación Matadero en Sayausí, durante 20 meses desde enero de 1990 a agosto de 1991, para la cuenca del río Tomebamba, y de 14 meses con los datos de Labrado, desde junio de 1966 a Julio de 1967, para Machángara.

Se observó que no existe una variación significativa en la ocurrencia de eventos de sequía hidrológica entre las dos microcuencas del río Machángara, es decir, los valores del SSI son similares tanto para la microcuenca del río Chulco (Labrado) y la microcuenca del río Machángara alto (Chanlud).

3.2.3.2. Intensidad

Corresponde a la severidad con la que se afecta un recurso hídrico, para su cuantificación se consideró el valor del SSI multiplicado por -1, siendo de mayor intensidad el valor mayor obtenido. A continuación, en la *Tabla 8* se presenta los eventos de sequía moderada, severa y extrema para cada estación y escala temporal del SSI, se muestra, además, las intensidades promedio y máxima obtenidas.

**Tabla 8.** Cuantificación de los meses de sequía y cálculo de intensidades. Cuencas de los ríos Machángara y Tomebamba.

Estación	Meses en estudio	Total meses secos	Porcent. %	Sequía moderada (N° meses)	Int. Prom	Sequía severa (N° meses)	Int. Prom	Sequía extrema (N° meses)	Int. Prom	Int. Max	Fecha Int. Máx
SSI mensual											
Chanlud	552	92	16.67	52	1.25	31	1.75	9	2.33	3.62	03/1985
Labrado	552	95	17.21	55	1.22	32	1.73	8	2.22	2.56	03/1985
Matadero en Sayausí	492	87	17.68	48	1.23	26	1.67	13	2.32	2.65	06/1988
SSI trimestral											
Chanlud	550	83	15.09	45	1.24	27	1.69	11	2.19	2.48	04/1985
Labrado	550	76	13.82	43	1.24	23	1.68	10	2.29	3.17	04/1985
Matadero en Sayausí	490	77	15.71	41	1.22	24	1.69	12	2.31	2.74	10/1995
SSI semestral											
Chanlud	547	91	16.64	60	1.21	20	1.75	11	2.40	2.89	07/1985
Labrado	547	86	15.72	55	1.20	20	1.73	11	2.40	2.89	05/1985
Matadero en Sayausí	487	84	17.25	51	1.27	26	1.71	7	2.10	2.40	01/1980
SSI anual											
Chanlud	541	86	15.9	64	1.18	14	1.77	8	2.27	2.62	10/1985
Labrado	541	85	17.56	69	1.20	12	1.65	14	2.29	2.69	11/1985
Matadero en Sayausí	481	3	18.71	49	1.22	38	1.69	3	2.17	2.25	04/1982

De la tabla anterior se resume que para todas las estaciones el porcentaje del total de meses secos (sequía moderada, severa y extrema), no supera el 20% del total de meses en análisis, siendo la estación Matadero en Sayausí, perteneciente al río Tomebamba, la que mayor frecuencia de meses secos presenta en todas las escalas del SSI (18,71%). La sequía moderada predominó sobre las otras dos categorías. Además, las intensidades promedio no difieren significativamente entre las tres estaciones para todas las escalas temporales.

Las intensidades máximas de sequía ocurridas en la cuenca del Machángara, se registraron durante el año de 1985, en todas las escalas de SSI. Para la cuenca del Tomebamba la ocurrencia de los eventos de sequía con intensidades máximas, varían según la escala del SSI, siendo en 1988 para la agregación mensual, 1995 para trimestral, 1980 para semestral y 1982 para anual.

Los valores de intensidad máxima en escala mensual se registró en Chanlud durante el mes de marzo de 1985 alcanzando un valor de 3.62, en escala trimestral en Labrado, con un valor de 3.17 durante el mes de abril de 1985, en escala semestral existe una coincidencia en la intensidad máxima (2.89) para Chanlud y Labrado, los dos se registran en 1985 en los

meses de julio y mayo respectivamente, en escala anual Labrado registra la máxima intensidad de 2.69 en noviembre de 1985.

Existen escasos estudios que analicen en específico el índice SSI en las cuencas Machángara y Tomebamba; sin embargo, se encontró algunas similitudes con los resultados obtenidos tras calcular otro índice estandarizado basado en la precipitación (SPI), utilizado para cuantificar la sequía meteorológica. Parte de los resultados obtenidos coinciden con lo indicado por Zhiña (2016), que determinó que en el año 1985 en la microcuenca del río Chulco, se registraron eventos de sequía extrema según el SSI y SPI calculado. El mismo resultado se recalca en el estudio realizado por Aguilar (2017), dónde determinó mediante el SPI, el año de 1985 como extremadamente seco. También Pacheco, Parra, & Avilés (2017), encontraron que los meses más secos, según el SPI, durante el lapso de 1980-2010, fueron en mayo y noviembre 1985, julio 1990, agosto de 1992, y junio y septiembre de 2002, años que concuerdan con ciertos resultados relevantes del cálculo del SSI del presente estudio.

Es importante mencionar que la relación entre los cambios de caudal y precipitación no son siempre proporcionales ni ocurren simultáneamente, sino que depende del grado de estrés hídrico en la que se encuentre la cuenca, es decir, en caso de existir déficit hídrico, un aumento de temperatura aumenta la demanda evaporativa y disminuye el aporte del subsuelo a los caudales (Centro de Cambio Global, 2009). De esta manera, el SSI no necesariamente coincide con valores del SPI. Esto se puede ejemplificar mediante lo indicado por Montalván (2018), que en su investigación realizada en las mismas cuencas, encontró lo contrario a lo especificado en este estudio con respecto a la frecuencia de meses secos, determinando que la cuenca del Machángara presenta mayor número de meses secos comparada con el Tomebamba. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, esta diferencia puede asociarse al uso del SPI a escala mensual en lugar del SSI y a su vez al periodo de análisis, que en su caso, abarca 10 años de análisis entre 2000-2010.

En general, los resultados SSI obtenidos tanto con los datos de entrada de los caudales en las represas El Labrado y Chanlud (cuenca del río Machángara), no presentan variaciones relevantes entre sí, pero son diferentes al ser comparados con los valores SSI obtenidos utilizando los datos de la estación Matadero en Sayausí (cuenca del río Tomebamba). Esto se puede justificar, con lo expuesto anteriormente sobre el estrés hídrico que puede diferir entre cuencas y además con lo mencionado por Celleri, Willems, Buytaert, & Feyen, (2007), que analizaron la variabilidad espacial de la precipitación en la cuenca del río Paute y definieron un coeficiente de correlación lineal de 0.75 entre la precipitación anual y la

elevación de las subcuencas ubicadas en la parte occidental, donde se encuentra ubicadas las subcuencas Machángara y Tomebamba. Entonces se puede inferir que por la ubicación a alturas similares entre las represas Labrado y Chanlud, la precipitación presenta patrones similares; sin embargo, Matadero en Sayausí se encuentra a una altura menor, pudiendo esto influir en la variación de precipitación y a su vez en los caudales.

3.3. Caracterización de la sequía agrícola según el VCI.

Se calculó el índice de condición de la vegetación, mediante imágenes satelitales del sensor MODIS, se analizó por un periodo de tiempo desde el año 2000 al 2010 para ambas cuencas en estudio, considerando únicamente las microcuencas ubicadas en la parte alta, puesto que únicamente se utilizaron tres puntos de toma de datos de los caudales ubicadas dentro de estas áreas. Los resultados de la evolución temporal de la media del VCI para las microcuencas del río Tomebamba y Machángara, se muestran en las Figuras 13 y 14, respectivamente.

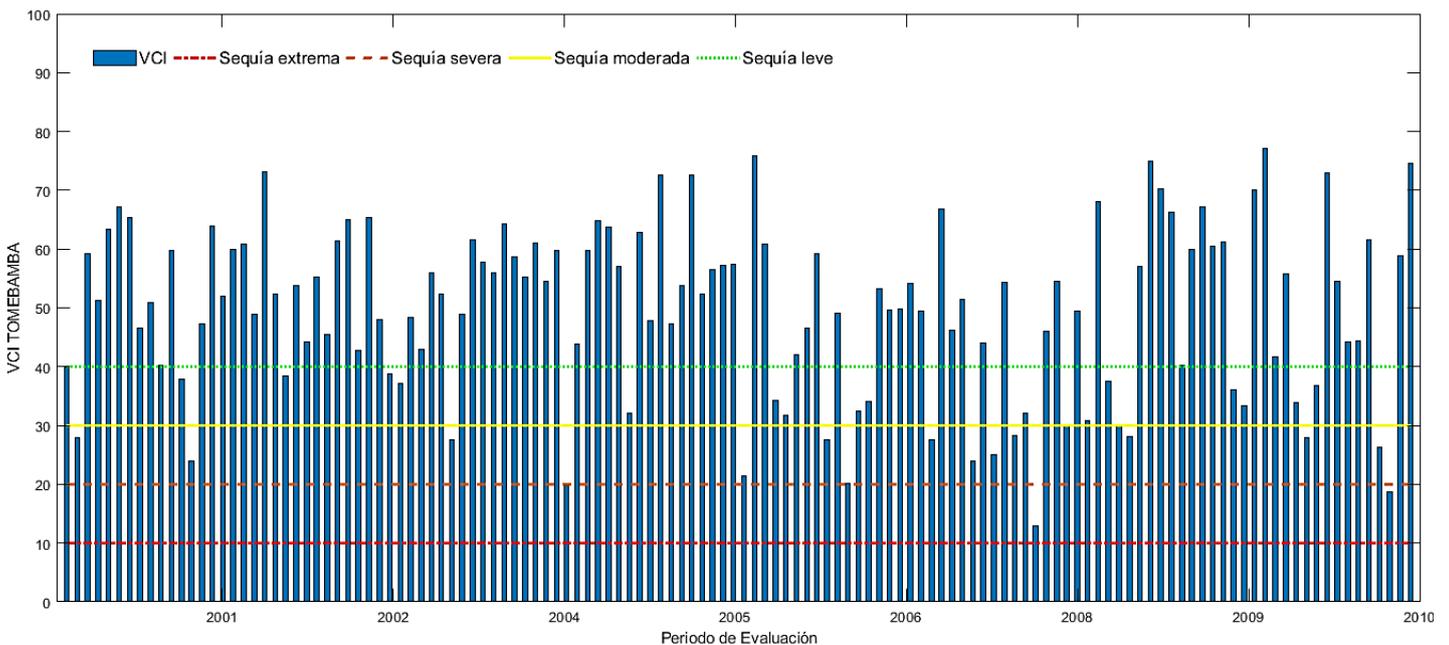


Figura 13. Evolución temporal del VCI. Microcuencas del Río Tomebamba.

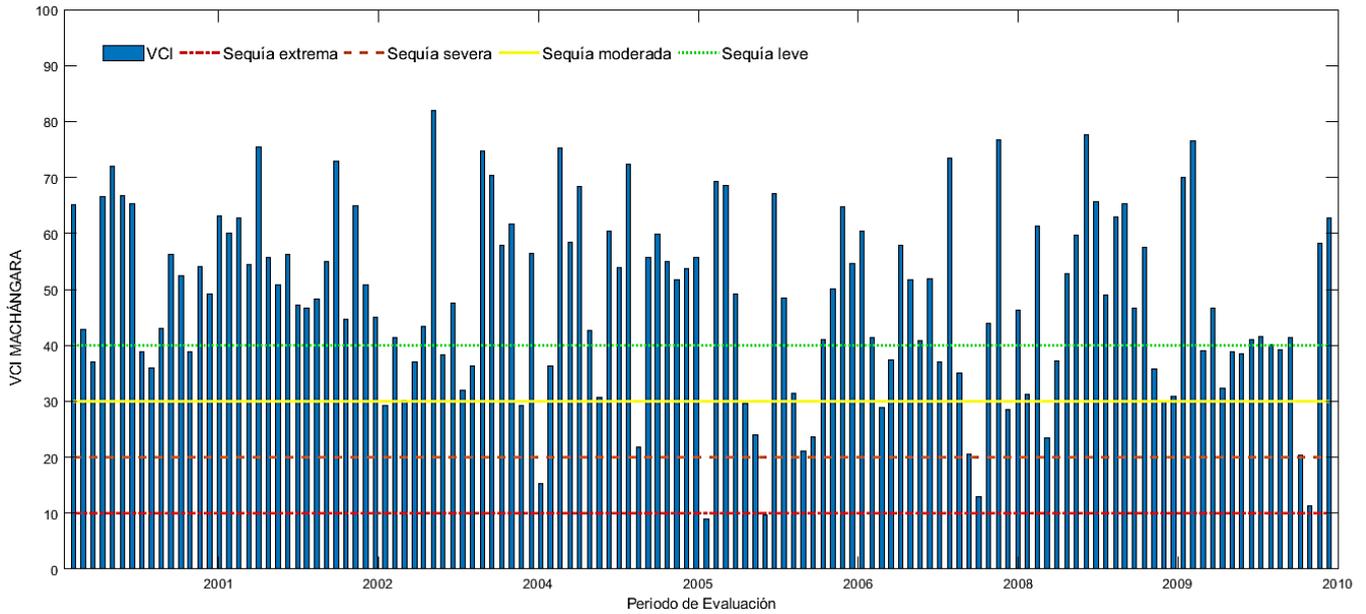


Figura 14. Evolución temporal del VCI. Microcuencas del Río Machángara.

Durante el periodo de evaluación para las microcuencas altas del río Tomebamba, no se registró ningún evento de sequía extrema (0-10), el mes más seco corresponde a diciembre del 2007 con un VCI equivalente a 12.88. Del total de meses analizados, el 2.31% se clasifica como sequía severa, 10.77% como sequía moderada, 13.85% como sequía leve y el 73.08% no presenta sequía. El año 2007 fue el periodo con mayor déficit hídrico, en la Figura 15 se representa gráficamente el estado de la vegetación para algunos meses dentro de este lapso de tiempo.

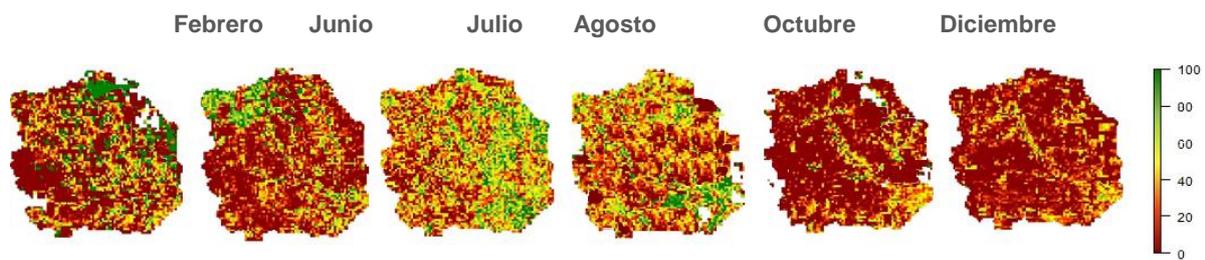


Figura 15. Principales meses secos durante el año 2007. Microcuencas del río Tomebamba.

A su vez, para las microcuencas del río Machángara, se registró dos valores mensuales clasificados como sequía extrema, ocurridos en agosto del 2005 y febrero del 2006. Del total de datos se observa que el 1.54% se clasifica como sequía extrema, 2.31% como sequía severa, 10% como sequía moderada, 18.46% como sequía leve y 67.69 no presenta sequía. En la Tabla 9, se resumen los resultados de este cálculo.

Tabla 9. Resultados obtenidos según el VCI. Cuencas de los ríos Tomebamba y Machángara.

Año	Tomebamba			Machángara		
	Media anual	Mes más seco	Valor mínimo	Media anual	Mes más seco	Valor mínimo
2000	51.20	Marzo	28	53.35	Noviembre	36.03
2001	51.53	Marzo	24	56.11	Marzo	38.94
2002	50.46	Noviembre	37.25	50.21	Noviembre	29.17
2003	53.55	Abril	27.63	50.93	Enero	30.09
2004	53.25	Marzo	19.83	49.96	Marzo	15.39
2005	51.79	Agosto	21.46	48.25	Agosto	9.01
2006	43.16	Junio	20.16	41.35	Febrero	9.69
2007	38.54	Diciembre	12.88	40.76	Diciembre	13.03
2008	48.08	Septiembre	28.10	50.36	Julio	23.48
2009	55.77	Agosto	33.42	50.86	Julio	29.95
2010	46.20	Octubre	18.66	38.81	Octubre	11.26

El año con el VCI promedio anual más bajo, para la cuenca del río Tomebamba, corresponde al 2007 y para Machángara al 2010, en ambos casos el valor medio mínimo se clasificó como sequía moderada, para los demás años la media anual representa una condición de vegetación sin sequía, es decir, por encima de 40 %. Cabe recalcar que, entre las dos cuencas, a pesar de tener un valor de media anual similar, no siempre coincidieron los meses más secos dentro del periodo de análisis. Se evidenció una ligera disminución del VCI durante los años 2006-2008 y 2010, en la cuenca del Tomebamba, y durante los años 2004-2007, 2010 en la cuenca del Tomebamba.

Montalván (2018), estudió la vegetación de las cuencas mediante el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), destacando que existe similitud entre ambas cuencas, y que no presentan tendencia, es decir, que se mantiene constante, en un estado clasificado como vegetación moderada a través de los años, debido a que por la orografía de las áreas la vegetación es parecida. En comparación con este estudio, cuando se utiliza el VCI, a pesar de que en el promedio anual de ambas cuencas no se notaron variaciones bruscas, se puede afirmar que para cada año no todos los meses determinados como más secos coinciden entre cuencas. Dejando abierta la posibilidad de que otros factores aparte de la orografía de la zona, sean los que influyen en el VCI. De hecho, Winkler, Gessner, & Hochschild (2017), explican que el estado de la cubierta vegetal, generalmente está influenciado no solo por la disponibilidad de agua, sino también por las actividades humanas como la agricultura, cambio de uso de suelo y otras influencias naturales como incendios o plagas.

3.4. Correlación cruzada entre el SSI y VCI

Se realizó una correlación cruzada para analizar la relación entre los índices SSI a diferentes escalas temporales y el VCI. Antes de realizar la correlación se comprobó la estacionariedad de las series, de lo cual se obtuvo que las series VCI, SSI 1 y SSI 3 son estacionarias, y las series SSI 6 y 12 son no estacionarias. Se procedió a verificar si las series están cointegradas mediante autocorrelaciones de los residuales de las regresiones SSI- VCI. En la *Figura 16*, se muestran los resultados de las autocorrelaciones para la cuenca del río Tomebamba, dónde se evidencia que las series sí están cointegradas, por lo tanto, se puede trabajar con la serie original, descartando la posibilidad de regresiones espurias.

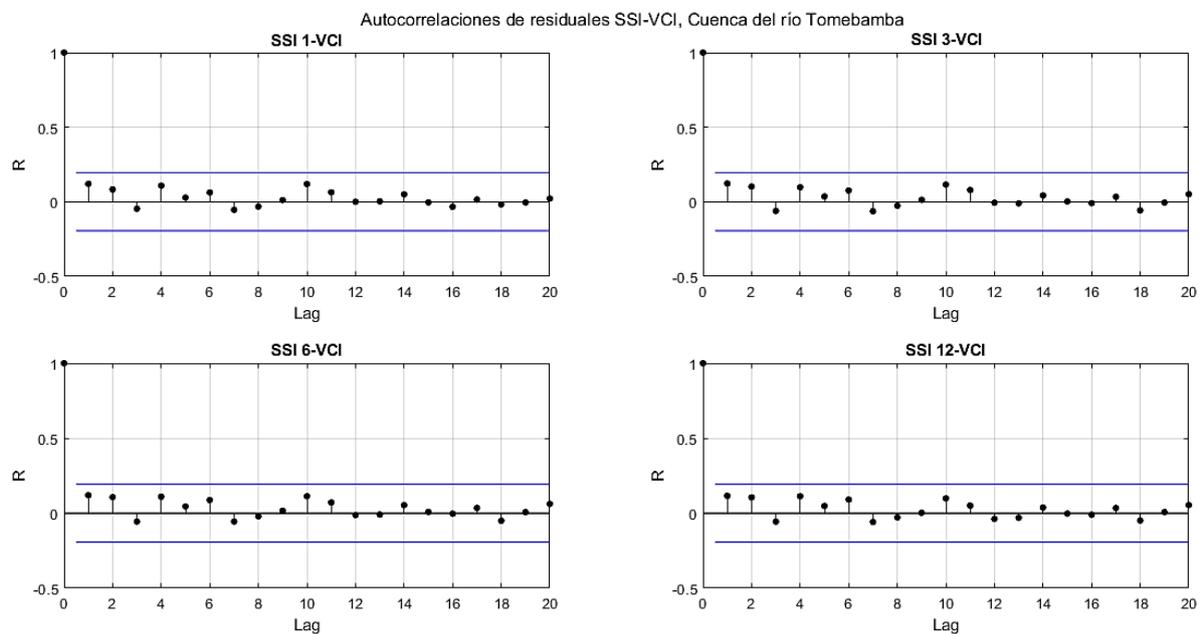


Figura 16. Autocorrelaciones de residuales. Cuenca del río Tomebamba.

Para la cuenca del río Machángara, se tiene una serie VCI y en total 8 series del SSI, donde 4 se obtuvieron con los datos de la represa Chanlud y 4 con El Labrado. En la *Figura 17*, se grafican los resultados de las autocorrelaciones para la comprobación de la estacionariedad de las series.

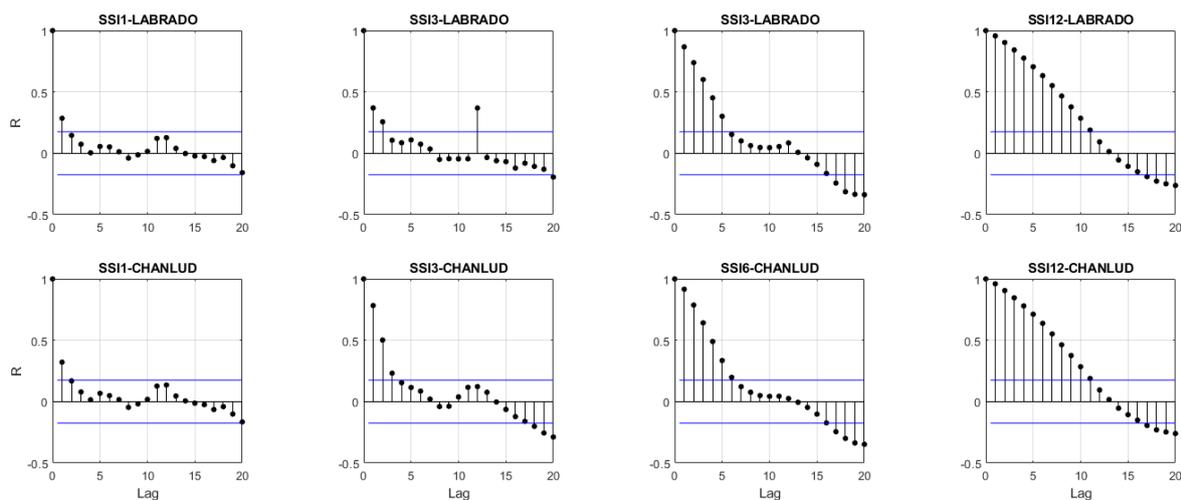


Figura 17. Comprobación de la estacionariedad de las series de tiempo Labrado y Chanlud. Cuenca del río Machángara.

Al no ser estacionarias según las gráficas de autocorrelaciones se procedió a comprobar la cointegración de las series, obteniendo los siguientes resultados mostrados en la *Figura 18*.

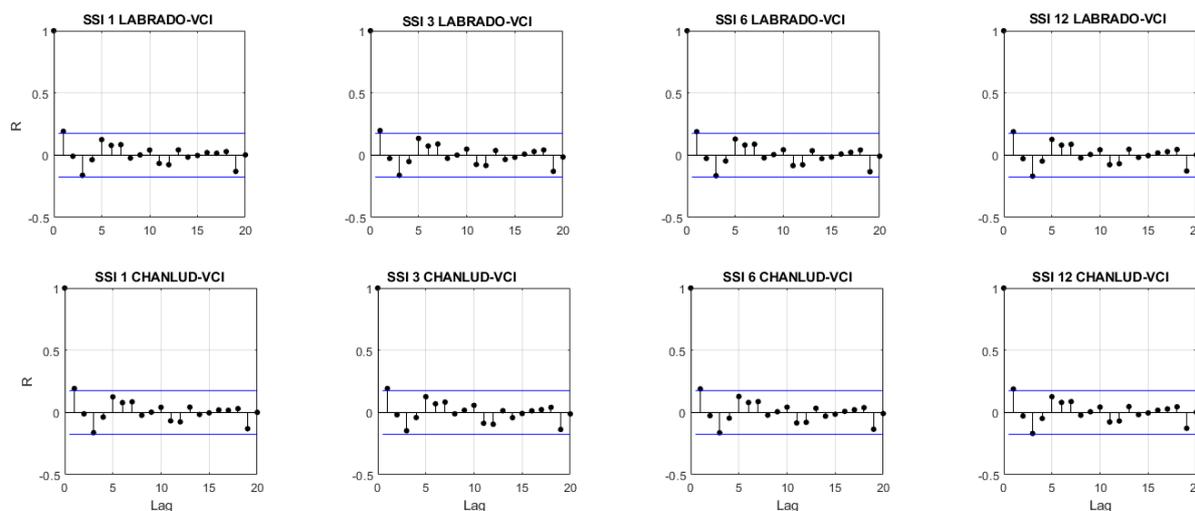


Figura 18. Comprobación de la cointegración de residuos de las regresiones SSI-VCI, cuenca de río Machángara.

Una vez comprobada la estacionariedad y cointegración, se realizó las correlaciones cruzadas con un retraso de hasta 12; sin embargo, se observó que a partir del lag 3, los coeficientes obtenidos eran muy bajos, por esta razón se muestran los resultados obtenidos hasta lag 3, los resultados se grafican en la *Figura 19* y *20*, para la cuenca del río Tomebamba y Machángara respectivamente.

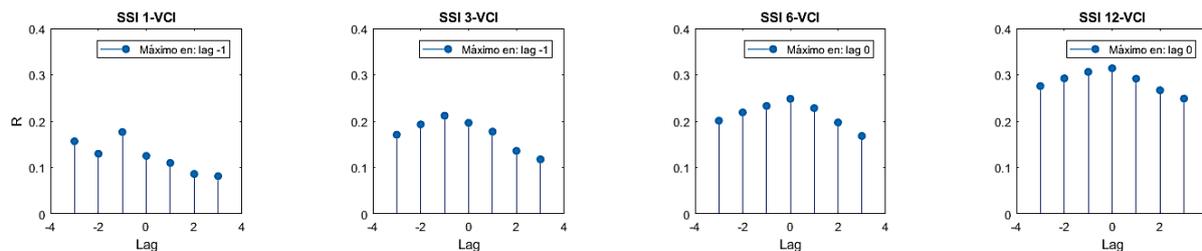


Figura 19. Correlación cruzada SSI-VCI, cuenca del río Tomebamba.

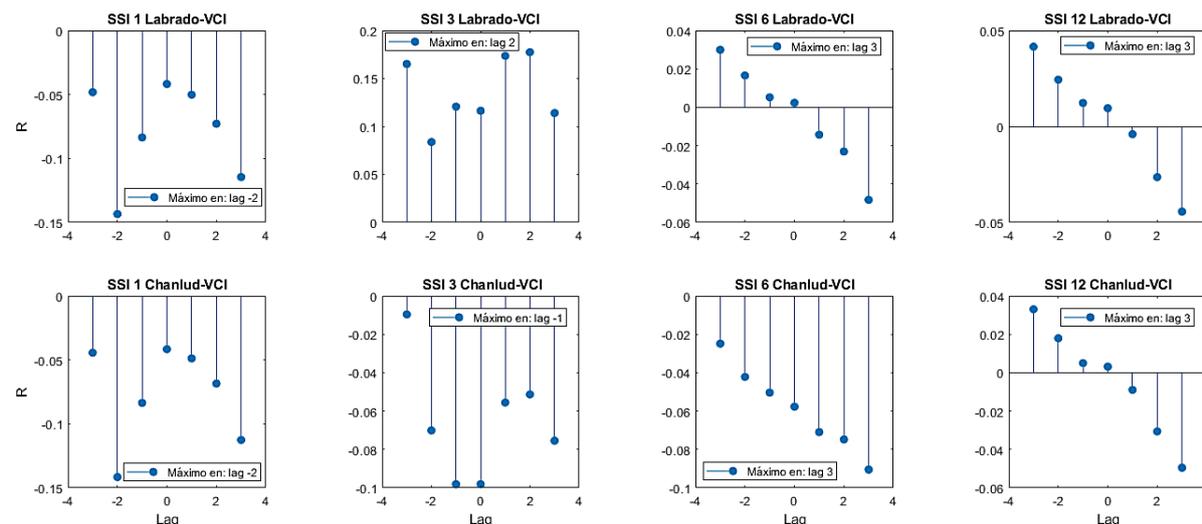


Figura 20. Correlación cruzada SSI-VCI, cuenca del río Machángara.

Se considera el mayor valor de R de las correlaciones cruzadas para verificar la significancia estadística, en la *Tabla 10* se presentan los resultados, donde se observa que para la cuenca del río Tomebamba el mayor coeficiente de correlación R se obtiene al realizar la correlación sin retraso (lag 0) utilizando la serie SSI 12. Para la cuenca del río Machángara la mayoría de correlaciones no son significativas, excepto la realizada con el SSI 3 Labrado, con un lag2.

Tabla 10. Resultados de la correlación cruzada entre SSI-VCI para las cuencas Tomebamba y Machángara.

SSI	Lag	R máxima	$1.96 * \frac{1}{\sqrt{(N-k)}}$	Significancia estadística
SSI Matadero en Sayausí-VCI Tomebamba				
1	-1	0.1766	0.19128	No
3	-1	0.2117	0.19128	Si
6	0	0.2481	0.19037	Si
12	0	0.3139	0.19037	Si
SSI Labrado-VCI Machángara				
1	-2	-0.1435	0.1732	No
3	2	0.1774	0.1732	Si
6	3	-0.04823	0.1739	No
12	3	-0.04437	0.1739	No

SSI Chanlud-VCI Machángara				
1	-2	-0.1416	0.1732	No
3	-1	-0.09814	0.1726	No
6	3	-0.09052	0.1739	No
12	3	-0.04954	0.1739	No

Pese a que existen correlaciones significativas, los coeficientes R no son superiores a 0.32, denotando la existencia de una correlación débil entre estas dos variables, lo que se traduce en que los efectos de la variación de caudales son intrascendentes en el estado de la vegetación. Resultados que son contrarios a lo citado por Lin et al. (2017), que menciona que el crecimiento de la vegetación sí se ve afectado por la evolución de los factores meteorológicos-hidrológicos; utilizando el VCI analizó la respuesta de la vegetación a las sequías hidrológicas, encontrando correlaciones de hasta 0.77 y una reacción retardada mayoritariamente de 0 a 4 meses de la vegetación con respecto a la sequía hidrológica. El contraste entre los resultados encontrados, puede deberse a que Lin et al. (2017), realizaron correlaciones cruzadas, pero separando el tiempo total de análisis por periodos, de esta forma, estableció comparaciones únicamente entre los lapsos considerados como más secos. También esta baja correlación puede explicarse considerando que el VCI evalúa el estado de la cubierta vegetal, misma que puede estar influenciada por varios otros factores. Otro aspecto a considerar, es la posibilidad de utilizar en futuros estudios otros índices basado en la teledetección y analizar la variabilidad entre ellos, con el objetivo de encontrar el más adecuado para la zona de estudio. Por ejemplo, Bento, Libonati, Gouveia, & DaCamara (2019), determinaron que el VCI es mejor cuando se calcula sobre las regiones más secas, y que por ejemplo el Índice de Condición de Temperatura (TCI), identifica mejor eventos de sequía que ocurren sobre las regiones más húmedas como la selva amazónica, dejando claro que no existe un índice único considerado como el mejor, sino más bien, que depende de las características de las regiones.

3.5. Relación del índice de condición de vegetación con índices climáticos

A través de la transformada wavelet se analizó la coherencia cuadrática entre las señales del VCI de las dos cuencas en estudio y los 16 principales índices climáticos. Las correlaciones significativas más relevantes con el VCI de la cuenca del río Tomebamba se muestra en la *Figura 21* y con el VCI de la cuenca del río Machángara en la *Figura 22*. En el Anexo 1 y 2 se adjunta los gráficos de coherencia wavelet para todos los índices utilizados.

Las coherencias significativas (nivel de significación al 5%) se enmarcan con un contorno grueso. Las flechas con un sentido de izquierda a derecha indican que la sequía hidrológica está en fase con el cambio en el índice climático, es decir existe una correlación positiva, y

las flechas que apuntan de derecha a izquierda indican una correlación negativa (antifase). El desfase entre variables, se pueden medir calculando el ángulo de fase entre señales o tomando como referencia que, las flechas en sentido vertical (hacia abajo o hacia arriba), representan la sequía retrasada o adelante del índice climático con $\frac{1}{4}$ de ciclo (90° según el ángulo de fase) (Lin et al., 2017). Se puede transformar el ángulo de fase a un retardo de tiempo equivalente; sin embargo, no es recomendable y en caso de realizarse debe hacerse con cuidado, puesto que una ventaja de 90° del índice climático (X) con respecto al VCI (Y) también podría ser una demora de 90° de X con respecto a Y, cuando las variables están en antifase, por lo tanto se recomienda utilizar otros métodos de soporte para la verificación (Grinsted et al., 2004). Para los resultados de esta sección, se calculó el ángulo de fase promedio y el retraso en meses equivalente, pero se aclara, que no se realizó un análisis minucioso para esta conversión, pudiendo existir errores. El cono de influencia se limita con la línea continua delgada e indica dónde se producen los efectos de borde en los datos de coherencia. No se consideran como erróneos los resultados fuera del cono de influencia, en caso de que las áreas de coherencia significativa sean extensas (MathWorks, 2016).

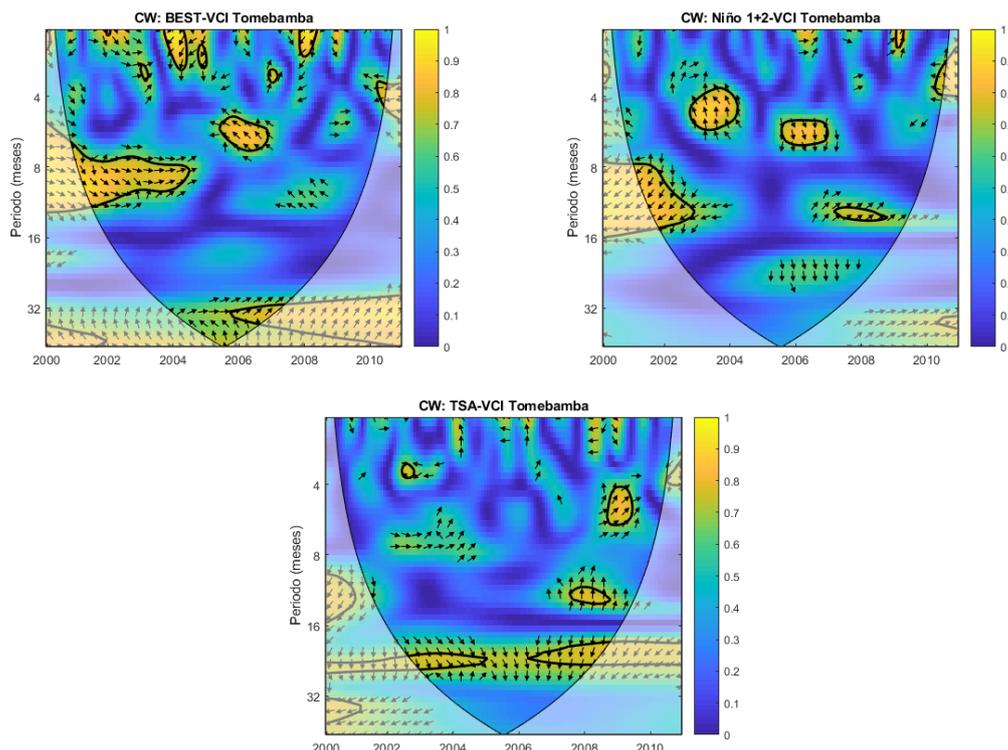


Figura 21. Coherencia Wavelet entre VCI de la cuenca del río Tomebamba y los índices climáticos (BEST, Niño 1+2, TSA). El nivel de significación del 5% se muestra con contorno grueso.

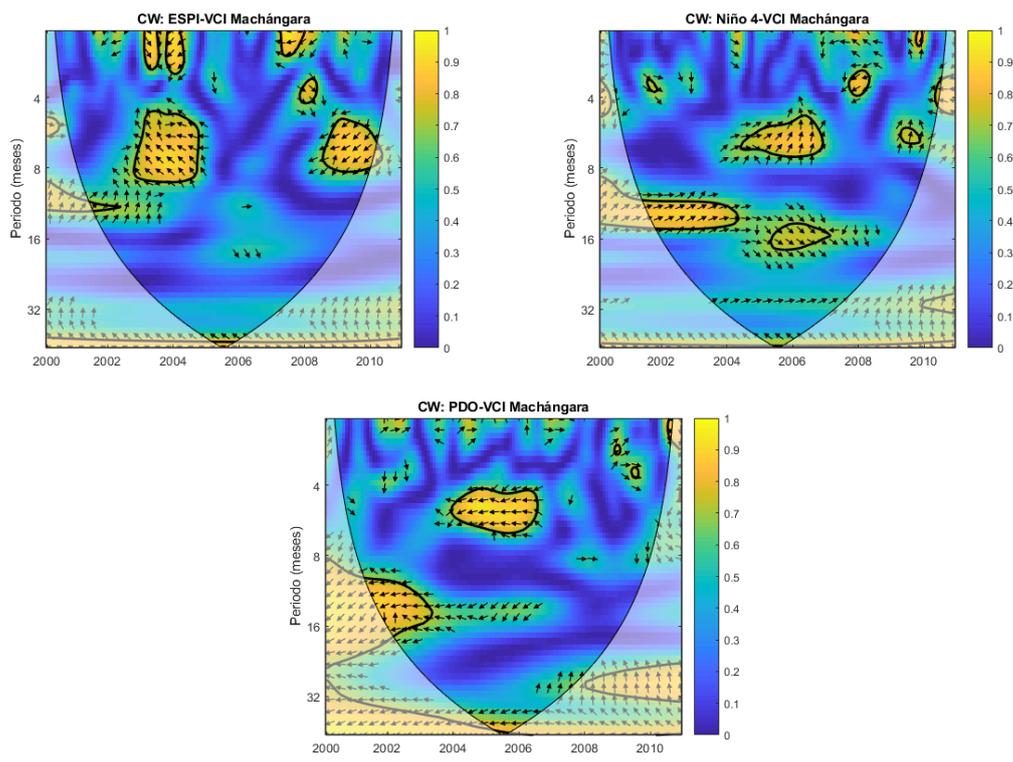


Figura 22. Coherencia Wavelet entre los índices climáticos (ESPI, Niño 4, PDO) y el VCI de la cuenca del río Machángara. El nivel de significación del 5% se muestra con contorno grueso.

En la *Tabla 11* se especifican los años de coherencia significativa en diferentes escalas, entre los índices climáticos seleccionados y VCI de las dos cuencas en estudio.

Tabla 11. Periodos y fechas de coherencia cuadrática significativa entre los índices climáticos y VCI.

Cuenca del río Tomebamba				
Índices seleccionados	Periodos observados (meses)	Fecha de CW significativa	Ángulo de fase promedio (Θ)	Desfase aproximado (meses)
BEST	4-8	2005-2006	120°	1.5-2
	8-16	2000-2004	320°	7-11
Niño 1+2	4-8	2003-2004	170°	2-3
		2005-2006	270°	3.5-5
	8-16	2000-2003	260°	6-11.5
TSA	4-8	2008-2009	70°	1-1.2
	8-16	2007-2008	90°	3.5-4
	16-32	2000-2005	270°	18
		2006-2010	270°	18
Cuenca del río Machángara				
ESPI	4-8	2003-2004	120°	1.5-2.5
		2008-2010	200°	3-4.5
Niño 4	4-8	2004-2006	80°	1-1.5
	8-16	2000-2004	40°	0.8-1.7
		2005-2007	310°	12-14
PDO	4-8	2004-2006	180°	2-3.5
	8-16	2000-2003	190°	4-8.5

Dónde: Θ representa el ángulo de fase, con el cual se puede estimar el retraso aproximado de Y con respecto a X, en los periodos especificados.

Según los resultados de coherencia cuadrática, se identificaron varias correlaciones superiores a ~ 0.8 , en diferentes escalas y tiempos. En todos los casos, se evidencia que no existe una respuesta inmediata del VCI a los factores climáticos, pues de acuerdo al ángulo de fase presentan con un tiempo de retraso o desfase. Cabe recalcar que el tiempo de retraso no es exacto.

Para la cuenca del Tomebamba, los índices con mayor área de correlación significativa fueron: BEST, Niño 1+2 y TSA; por otra parte, para la cuenca del Machángara ESPI, Niño 4, PDO. Todos estos índices presentan una similitud, una coherencia alta entre los periodos $\sim 8-16$, durante los años 2000-2005. La fase varía de acuerdo al índice seleccionado, evidenciándose correlaciones positivas y negativas. Los índices BEST, Niño 1+2, ESPI, Niño 4 y PDO, generalmente son utilizados para detectar la ocurrencia del fenómeno ENSO, esto explicaría la aproximación entre ellos para detectar coherencias. Efectivamente, según datos de la NOAA, durante 2000-2010, se determinaron, mediante el índice ONI, los siguientes eventos moderados de El Niño: 2002-03, 2009-10 y eventos débiles 2004-05, 2006-07. Eventos fuertes de La Niña en 2010-11, eventos débiles durante 2000-01, 2005-06 y 2008-09. Como se puede observar entre el 2000 y 2005, han ocurrido eventos moderados y débiles del Niño y la Niña, por lo tanto, se puede inferir que el ENSO si influyó en esos periodos en la condición de la vegetación. Otra observación que vale mencionar, es que de igual forma el índice TSA, mostró correlaciones con el VCI, durante algunos eventos de El Niño y La Niña. Al analizar los promedios más bajos del VCI, ocurridos en 2006-2008 y 2010 para el Tomebamba, se encontró que coinciden con coherencias significativas en periodos entre 16-32 meses con el TSA; y de hecho en estos años ocurrieron eventos moderados de El Niño. Por otra parte, el VCI del Machángara, tiene un decrecimiento en 2004-2007, concordando con secciones de coherencia del Niño 4 y PDO, tiempo en el que ocurrió también un evento moderado del Niño.

Para las cuencas analizadas, se ha realizado un estudio anterior de la relación entre el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y los índices climáticos asociados al fenómeno ENSO, y se concluyó que el índice TNI y Niño 1+2 son los que influyen en la vegetación en la cuenca del Tomebamba con retraso de 3 y 9 meses y coeficientes de correlación de 0.16 y -0.15 respectivamente. Para la cuenca del Machángara únicamente se encontró una correlación con el Niño 1+2 con retraso de 9 meses y coeficiente igual a -0.15 (Montalván, 2018). Contrastando con estos resultados, con el método de coherencia wavelet, se encontraron correlaciones significativas con coeficientes superiores a 0.8. Se coincide únicamente con la determinación de la influencia del Niño 1+2 en el Tomebamba; sin embargo, en el estudio de Montalván (2018), no se utilizaron todos los índices utilizados en el presente documento y se empleó otro método de correlación.

Se realizó también un estudio a escala espacial más grande, cubriendo toda la zona de Sudamérica, donde se correlacionó el Índice de las condiciones de Temperatura (TCI), que sirve para determinar el estrés en la vegetación causado por las temperaturas y la humedad excesiva, y el índice Niño 3.4, llegando al resultado que la vegetación en la parte norte de Sudamérica tiene una fuerte correlación negativa con El Niño, lo que significa que la ocurrencia de tal evento degrada la salud de la vegetación (Bento et al., 2019). Lo mismo se corroboró utilizando los índices VCI y salud de la vegetación (VHI), determinando que los ecosistemas del norte de Sudamérica, experimentan un estrés térmico durante El Niño y condiciones favorables durante los años de La Niña (Kogan, 2011).

De la evaluación de todas las correlaciones significativas encontradas entre los índices climáticos del Pacífico y Atlántico con el VCI de ambas cuencas, se evidencia que no se podría seleccionar un índice único para monitorear o predecir sequías agrícolas cuantificadas mediante el VCI, puesto que a pesar de que si se hallaron coherencias altas, estas en su mayoría no son constantes en el periodo y tiempo, frente a esto, el TSA con una periodicidad de 24 meses, es el único que presenta un patrón de correlación alta casi constante con el VCI Tomebamba a través del tiempo de análisis, por lo tanto se sugiere realizar una investigación más profunda entorno a este índice para futuros estudios.

3.6. Relación del índice de sequía hidrológica con índices climáticos a gran escala.

Las investigaciones con respecto a la formación de sequías, han reconocido que los cambios en la temperatura global del océano o en factores climáticos a gran escala como el ENOS, NAO y el PDO, pueden ser cruciales para la formación de sequías (Lin et al., 2017). Por consiguiente, se estudiaron también las relaciones entre la severidad de la sequía hidrológica y los principales índices climáticos a través del análisis de Coherencia Wavelet.

Se utilizaron los índices de sequía hidrológica (SSI) mensual, trimestral, semestral y anual de cada punto de análisis en ambas cuencas y 16 índices climáticos, los mejores resultados para la cuenca del río Machángara se muestran en la *Figura 23 y 24*. Los gráficos completos se adjuntan en el Anexo 3 y 4.

Se puede observar que los resultados utilizando los datos de Chanlud y Labrado, son similares; con el SSI mensual, los índices climáticos que muestran coherencias significativas más relevantes son: Niño 4, TNI, para Chanlud, y Niño 4, ONI, TNI, para Labrado. Con el SSI trimestral y semestral: Niño 4, TNI, para Chanlud y Labrado. Con el SSI anual: ESPI, Niño 4, TNI, para Chanlud y Labrado. En general, con cada índice mencionado anteriormente, las secciones que indican coherencia, no difieren significativamente entre cada escala del SSI. Se puede mencionar que utilizando el SSI anual, las áreas de

coherencia entre los periodos entre 4 y 16 meses disminuyen o no son visibles; sin embargo, se incrementa el área de coherencia en los periodos superiores a 16.

Para Chanlud y Labrado, la correlación con el Niño 4 fue mayor que la de otros índices, en todas las escalas del SSI. El efecto de la TSM en la región Niño 4 sobre la sequía hidrológica fue principalmente en los periodos de 24-128 meses (2-10.5 años), sin embargo solo durante el periodo alrededor de 128 meses se mantuvo la correlación negativa constante. Lo mismo ocurre con el TNI, que mantiene, en este caso una correlación positiva en el periodo alrededor de 128.

Con el índice ESPI, durante los años 1987-1998, se señala una coherencia negativa en el periodo ~32; en año 1995, coherencia positiva en los periodos entre 8-16. En periodos superiores a 64, a partir de 1995 al 2010, se muestra coherencia negativa.

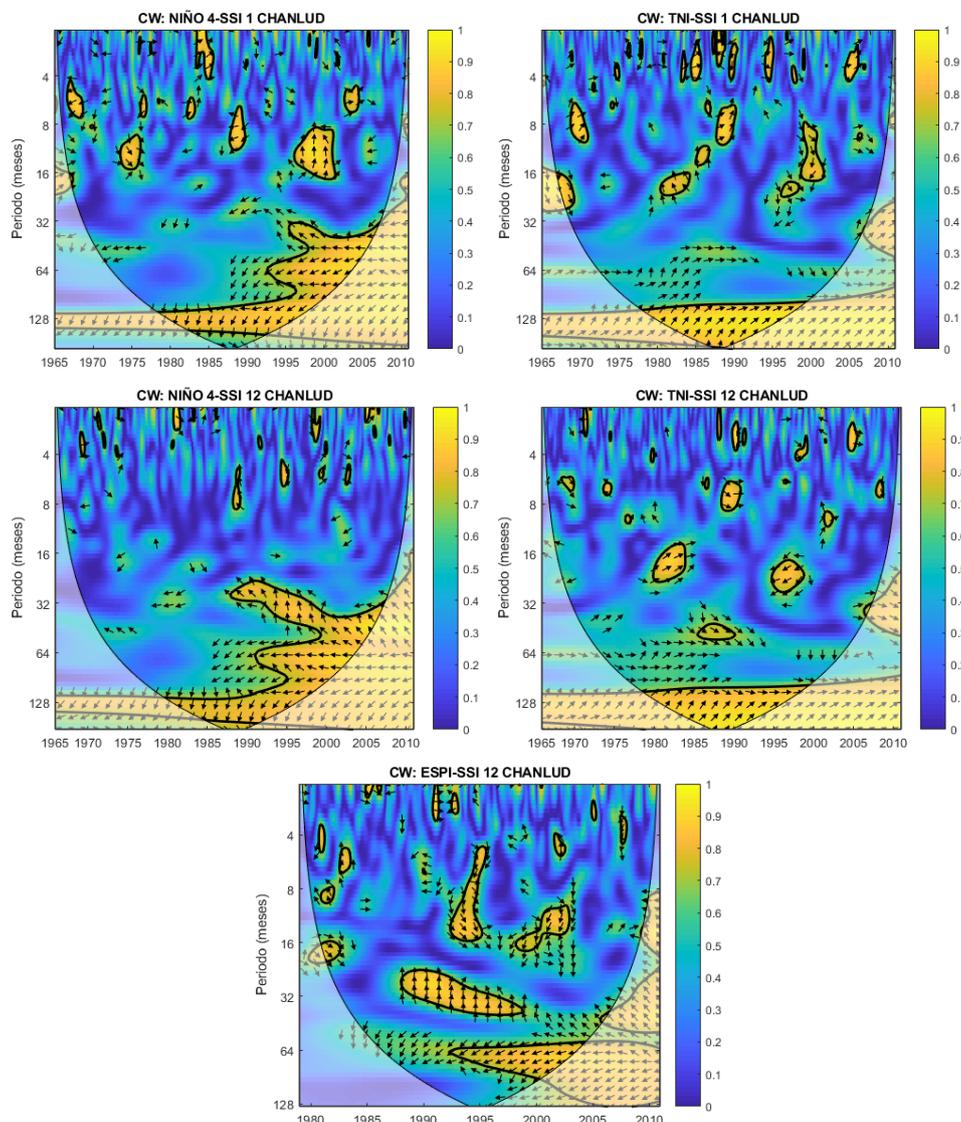


Figura 23. Coherencias significativas entre SSI Chanlud e índices climáticos. Cuenca del río Machángara.

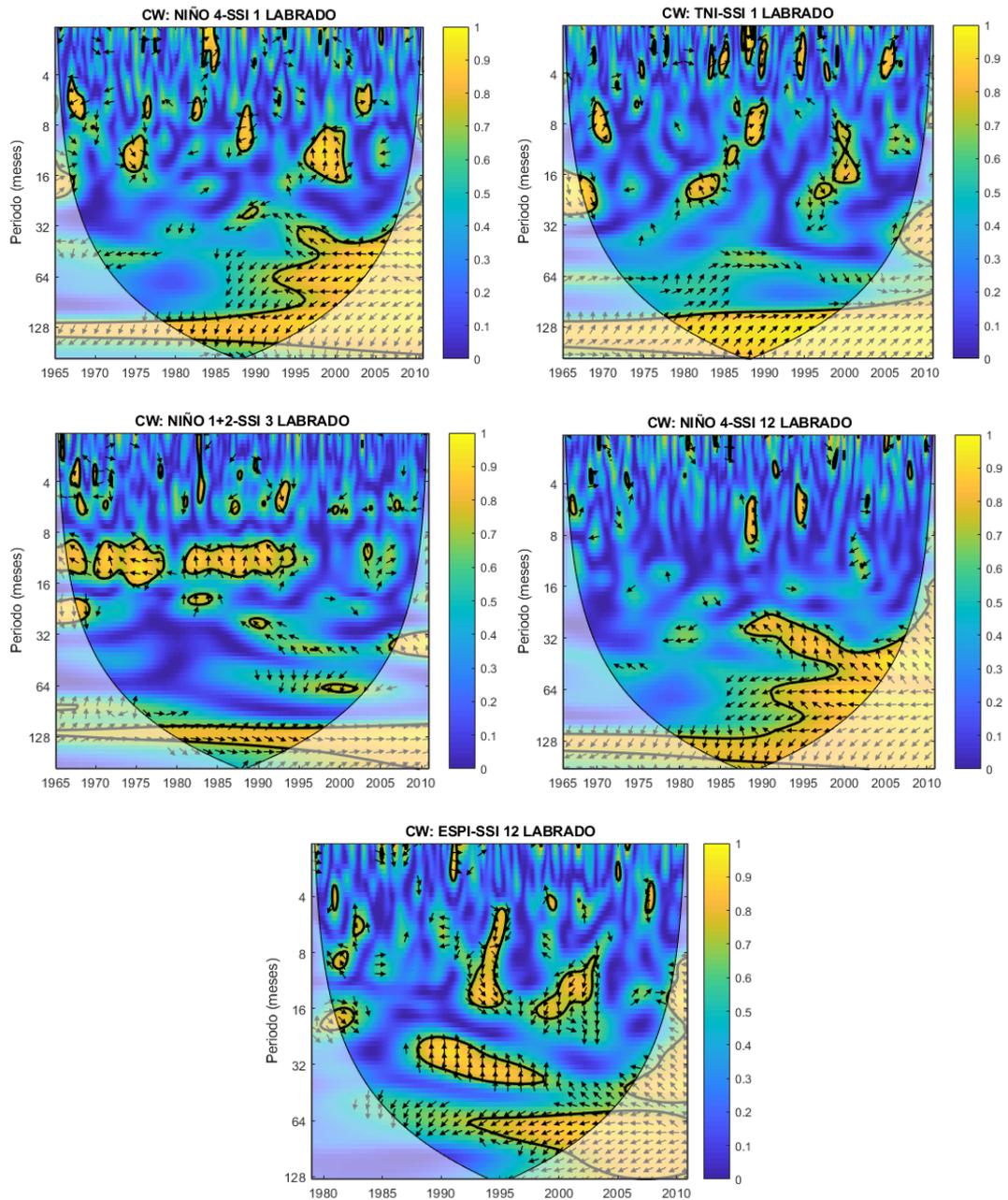


Figura 24. Coherencias significativas entre SSI Labrado e índices climáticos. Cuenca del río Machángara.

Para la cuenca del río Tomebamba, las coherencias significativas relevantes se muestra en la Figura 25. A escala trimestral del SSI, se muestran mejores resultados para SOI, a escala semestral para MEI y ONI, a escala anual para ESPI y TSA.

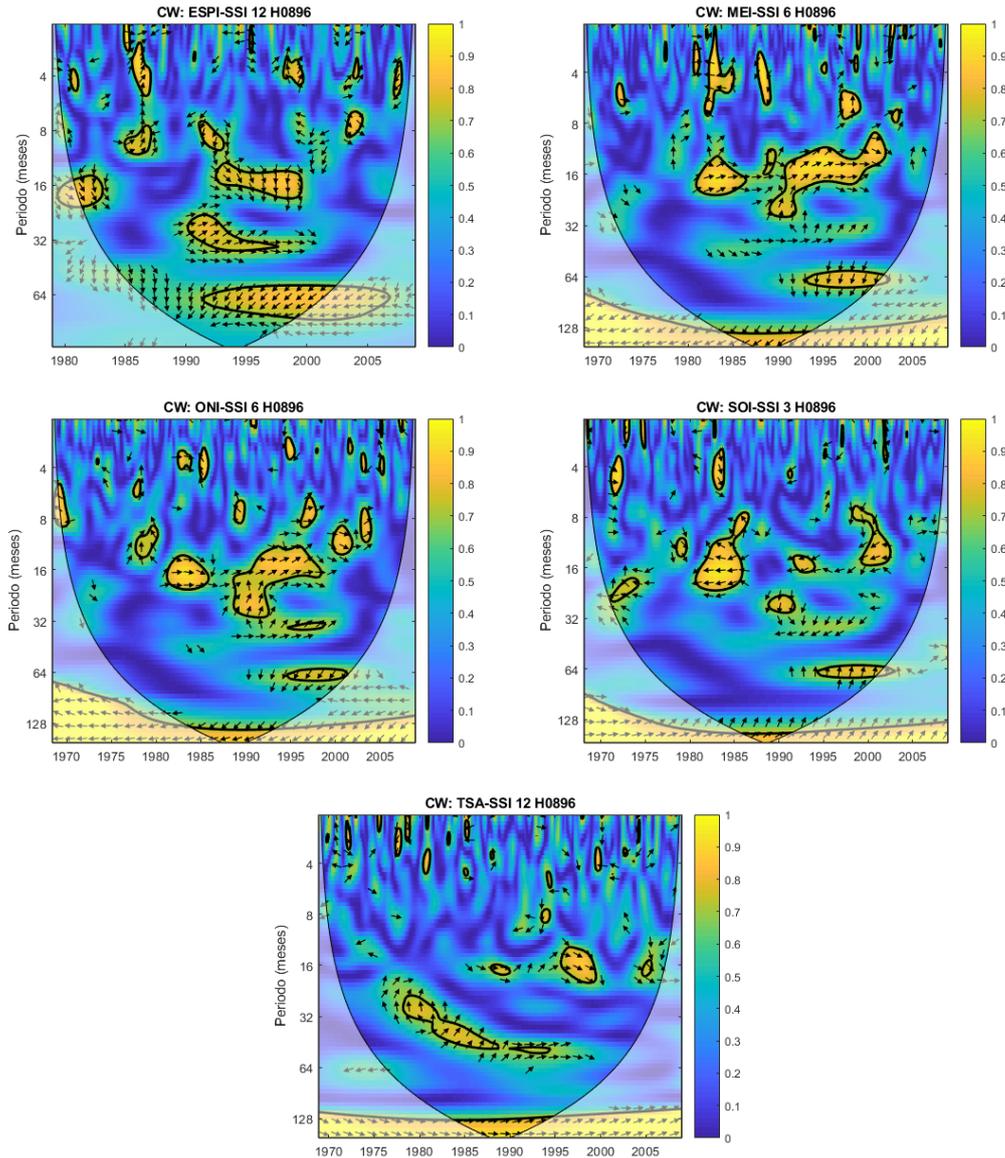


Figura 25. Coherencias significativas entre SSI Matadero en Sayausí e índices climáticos. Cuenca del río Tomebamba.

Con el índice ESPI, se observó coherencias significativas positivas en los periodos entre 8-16, durante los años 1987, y negativas entre 1992-1999. También correlaciones positivas entre los periodos 16-32 durante 1990-1997, y negativas en los periodos alrededor de 64 meses durante los años 1992-2007; esta última es la mayor relevancia mostrando comparada con las coherencias localizadas en periodos inferiores.

Con los índices MEI, ONI y SOI, se muestra un área en común alrededor del periodo 64 (5.3 años) en los años entre 1995-2000. Los índices MEI y ONI, coinciden también en los periodos 12-32 durante los años 1987-2002 con una fase positiva. Con el TSA, se observan coherencias positivas en los periodos entre 24-48 durante 1977-1987.

Entre todos los índices anteriores seleccionados, se destaca la existencia de una correlación constante durante todo el tiempo de análisis en el periodo alrededor de 128 meses (~10 años), siendo positiva para MEI y ONI, y negativa para SOI y TSA.

Para la cuenca del río Machángara, los resultados obtenidos son similares utilizando los datos de caudales de entrada de la represa Chanlud como de Labrado, esto se justifica puesto que las series SSI para ambos puntos están altamente correlacionadas. Los índices climáticos que resaltaron, independientemente de la escala del SSI, son el ESPI, Niño 4 y TNI. Los dos últimos muestran una constante coherencia cuadrática positiva en el periodo alrededor de 128 meses, mientras que las áreas correlacionadas significativas a periodos inferiores no son relevantes. Con el índice ESPI, se destacan varias secciones de coherencia, pero en diferentes periodos, es decir, no existe una coherencia constante en un solo periodo definido, durante el tiempo de análisis. El índice ESPI marca correlaciones negativas en 1987-1998, y una sección más relevante desde 1995-2010, en un periodo de 64 meses.

Para la cuenca del río Tomebamba, los índices climáticos de mayor relevancia son: con el SSI 3 el índice SOI, con el SSI 6, MEI y ONI, y con el SSI 12, ESPI y TSA. Al igual que con la otra cuenca, casi todos presentan una correlación constante alrededor del periodo 128, excepto el índice ESPI, siendo negativa con MEI y ONI, y positiva con el índice SOI y TSA. A periodos inferiores, para todos los índices, las áreas marcadas de alta coherencia tienen gran similitud entre sí; destacándose una correlación negativa con el ESPI durante 1992-2007, una correlación positiva con MEI y ONI durante 1987-2002, correlación negativa con el SOI en 1995-2000 y positiva en mismo lapso de tiempo con MEI y SOI, correlación positiva con el TSA durante 1977-87. Estos lapsos de tiempo, coinciden con años de eventos entre medio, fuerte y muy fuerte del Niño y la Niña.

Existen otros estudios realizados alrededor del año 1996, donde se investiga las relaciones entre fenómenos climáticos como el ENSO y la hidrología de la cuenca del río Paute, donde se descartó la existencia de relaciones significativas entre las variables, años más tarde en 1999, se señaló que El Niño sí causa efectos en la distribución de caudales mensuales en las cuencas amazónicas, además que los volúmenes anuales de ingreso al embalse Amaluza están correlacionados significativamente con las anomalías de la TSM en las regiones El Niño 1+2, en la fase de La Niña (Hoorelbeke et al., 2000). Estudios más recientes, han encontrado relaciones entre las precipitaciones en Sudamérica y el fenómeno ENSO, e indican que ciertamente la fase cálida El Niño está asociada a las sequías meteorológicas del norte de Sudamérica incluyendo la selva amazónica, y la fase fría La Niña, afecta al sur del continente (Bento et al., 2019).

Comparando con otros estudios similares en cuencas andinas, Lavado & Espinoza (2014), han hallado que en la región sur andina del Perú, las lluvias disminuyen durante un evento fuerte de El Niño y aumentan durante un evento fuerte de La Niña. Por otra parte, en la cuenca hidrográfica del río Cali (Colombia), se encontró que las variables macroclimáticas ONI y MEI son las que tienen mayor influencia sobre las variables precipitación y caudal, destacando que el caudal se ve mayormente influenciado por el ENOS ($r=-0.44$), debido al proceso de almacenaje de agua en acuíferos o a las condiciones de humedad antecedente en el suelo, generando una memoria histórica en las series de caudales (Ávila Díaz, Carvajal Escobar, & Gutiérrez Serna, 2014).

Se confirma entonces que, el fenómeno ENSO tiene influencia en la sequía hidrológica de las cuencas andinas Machángara y Tomebamba. Los índices del Pacífico que mejores correlaciones muestran no son iguales para las dos cuencas, pese a que están ubicadas conjuntamente, demostrando que no se podría generalizar y escoger un solo índice. Para obtener mejores correlaciones, fue efectivo realizar el método de coherencia Wavelet, puesto que nos permitió determinar que los coeficientes de coherencia cuadrática son superiores a 0.7 y se mantienen constantes en el tiempo, en un periodo de 128 meses aproximadamente. En periodos inferiores solo resaltan correlaciones significativas altas durante algunos de los eventos fuertes y moderados de El Niño y La Niña, por lo que, si se desearía realizar predicciones de sequía utilizando estos periodos, existiría un margen de error grande, porque el resto del lapso de tiempo de análisis, donde no ocurren estos eventos, se mantienen coherencias no significativas. Se aporta también que el Índice Tropical del Atlántico sur (TSA), tiene influencia en la cuenca del Tomebamba tanto en los caudales como en la vegetación.

El periodo que demuestra una correlación constante con los caudales, es ~128 meses, al igual que con los índices del Pacífico, por ende, no se descarta la posibilidad de que, como ya ha mencionado Kayano et al. (2009), la variabilidad interanual del clima de América del Sur también está relacionada con las variaciones de la TSM en el Atlántico tropical y también que el ENSO maneja indirectamente la relación entre el TSA y las variaciones hidrológicas en Sudamérica.

3.7. Identificación de los índices climáticos del Pacífico y Atlántico que influyen en la variabilidad climática de las cuencas Machángara y Tomebamba.

Luego de realizar todas las correlaciones mediante análisis wavelet entre los principales índices climáticos del Pacífico y Atlántico y los índices de sequía hidrológica estandarizados a diferentes escalas, se identificó que:



- Existe una influencia predominante de los índices del Pacífico que del Atlántico en ambas cuencas; aunque se destaca la correlación alta existente entre el TSA y el SSI de la cuenca del Tomebamba.
- Los índices más adecuados para evaluar la sequía hidrológica en la cuenca del Machángara son el Niño 4 y TNI, y para la cuenca del Tomebamba, los índices MEI, ONI, SOI y TSA.
- Es importante considerar que, entre los índices mencionados con anterioridad, no se puede determinar uno solo como el mejor, puesto que todos presentan coherencias significativas altas y constantes a través del tiempo (periodo 128). Por ende, antes de seleccionar uno como idóneo, se debería realizar un análisis más profundo enfocado en el periodo de 128 meses y sus aproximados.

4. CONCLUSIONES

Se analizaron las relaciones entre los factores climáticos a gran escala y la sequía hidrológica y agrícola de las cuencas de los ríos Machángara y Tomebamba, utilizando para ello el índice de caudal estandarizado (SSI), el índice de la condición de la vegetación (VCI) y los principales índices climáticos del océano Pacífico y Atlántico. Las correlaciones se efectuaron mediante un análisis de Transformadas Wavelets Continuas.

De las series de índices estandarizados de sequía hidrológica, se destaca en primer lugar, que los resultados obtenidos utilizando los datos de caudales de entrada de las represas Labrado y Chanlud son similares, por lo tanto para evaluaciones de correlaciones posteriores, estos no muestran variaciones significativas.

Del análisis de la sequía hidrológica, se concluye que las duraciones de sequía más largas se evidenciaron al agregar los caudales anualmente y que los meses secos no sobrepasaron el 20% del total de meses analizados, siendo en la cuenca del río Tomebamba dónde más eventos de sequía se han registrado. Además, al comparar con otros estudios, se encontró que existe concordancia con el índice estandarizado de precipitación, utilizado para calcular la sequía meteorológica. La serie SSI de Matadero en Sayausí, difiere de los valores obtenidos para la cuenca de Machángara, demostrando que a pesar de pertenecer ambas a la cuenca del río Paute, existe variabilidad hidrológica entre ellas.

Con respecto al análisis de la sequía agrícola mediante el VCI, se concluye que los promedios anuales en ambas cuencas clasifican mayoritariamente a la vegetación como sin sequía, existen solo pequeñas varianzas entre los años de análisis; sin embargo, cabe recalcar que el periodo de análisis para este índice fue corto (2000-2010) es necesario, para futuros estudios incrementar este lapso de tiempo para tener una mejor visión y evaluación de la sequía agrícola.

Los resultados de las correlaciones cruzadas entre VCI-SSI, no fueron relevantes, a pesar de que, si se encontraron correlaciones significativas para la cuenca del Tomebamba, estas son débiles; y no se puede afirmar que las variaciones en los caudales en las cuencas influyen en el estado de la vegetación de esas áreas.

Finalmente, la parte fundamental de este estudio, corresponde a los análisis de relaciones entre SSI y VCI con los índices climáticos del Pacífico y Atlántico, para este procedimiento, se utilizó el método de coherencia cuadrática wavelet, que demostró que al analizar señales simultáneamente en el plano de la frecuencia-tiempo, se detecta más efectivamente las relaciones entre variables que no son evidentes empleando métodos convencionales.

Se evidencia que el índice VCI muestra áreas localizadas de correlaciones con el fenómeno ENSO, siendo en su mayoría áreas que coinciden con eventos fuertes y moderados de El Niño y la Niña; los índices del Pacífico que mayores secciones de correlación demostraron fueron: BEST, Niño 1+2, para la cuenca del Tomebamba. Por otra parte, para la cuenca del Machángara ESPI, Niño 4, PDO. No obstante, no se puede seleccionar un solo índice para monitorear o predecir sequías agrícolas, cuantificadas mediante el VCI, puesto que aun cuando se hallaron coherencias altas, estas en su mayoría no son constantes en el periodo y tiempo de análisis. Con respecto a los índices del Atlántico, la relación que más se acentúa, incluso mejor que con los índices del Pacífico, es la obtenida entre el TSA-VCI Tomebamba, que es el único que denota una correlación casi constante en el periodo de 24 meses.

Respectivamente, para las relaciones entre los índices climáticos y el índice de sequía hidrológica (SSI), se detectó que los mejores son El Niño 4 y TNI, para la cuenca del Machángara, y SOI, MEI, ONI, y TSA, para el Tomebamba. De todos los índices seleccionados, se observó que en periodos pequeños no existe un patrón de respuesta de las sequías; sin embargo, para periodos alrededor de 128 meses, si se define una correlación constante a través del tiempo de estudio, no solo con los índices del Pacífico, sino también con el TSA del Atlántico. Es importante recalcar la aparición del TSA, como un índice que influye en la variabilidad hidrológica de la cuenca del río Tomebamba, esto corrobora lo mencionado por otros autores en estudios previos, acerca de la posibilidad de que las temperaturas superficiales del mar del Atlántico Tropical, también influyen en la variabilidad climática de América del Sur y que, a su vez, el TSA está indirectamente interconectado con el ENSO.

Recomendaciones

Para investigaciones futuras, se recomienda extender las series de datos, considerar más estaciones de monitoreo, y otros índices para tener un mejor entendimiento de las sequías las cuencas. Se podría considerar el uso de índices que consideren la evapotranspiración, pues los sistemas hidrológicos están limitados más por energía que por disponibilidad de agua.

De igual forma, es importante considerar otros índices de vegetación para la estimación de la sequía agrícola, e incrementar el periodo de análisis. Según las recomendaciones de OMS, una base de 30 años es la mínima para examinar los procesos climáticos, en este estudio, la disponibilidad de datos del sensor MODIS de dónde se extrajo la información para el cálculo del VCI, fue un limitante para cumplir con esa sugerencia.

Con respecto a la utilización de transformada wavelet, se recomienda realizar un análisis más detallado con respecto a la fase y desfase entre series, para estimar con certeza los retardos de tiempo de reacción entre variables. De igual forma, con los índices seleccionados como mejores en este estudio, se podría realizar una evaluación más profunda enfocada en los periodos en los que las correlaciones fueron significativas y constantes.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar, K. (2017). Caracterización de las sequías meteorológicas en la cuenca del paute mediante la aplicación del índice de precipitación estandarizado en diversas escalas temporales. Recuperado de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/28727>
- Andreoli, R., & Kayano, M. (2019). *Multi-escalas da variabilidade da temperatura da superfície do mar no Atlântico Tropical*.
- Araújo, W. dos S., & Brito, J. I. B. de. (2011). Indices of trends of climatic changes for the states of the Bahia and Sergipe by means of daily precipitation indices and its relation with SST'S of the Pacific and Atlantic. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 26(4), 541-554. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862011000400004>
- Ávila Díaz, Á. J., Carvajal Escobar, Y., & Gutiérrez Serna, S. E. (2014). Análisis de la influencia de El Niño y La Niña en la oferta hídrica mensual de la cuenca del río Cali. *Tecnura*, 18(41), 120-133.
- Bento, V., Libonati, R., Gouveia, C., & DaCamara, C. (2019). Understanding the impact of ENSO-related droughts over South American vegetation health. 1.
- Bhuiyan, C. (2004). *Various Drought Indices For Monitoring Drought Condition In Aravalli Terrain Of India*. 6.
- Boudad, B., Sahbi, H., & Mansouri, I. (2018). Analysis of meteorological and hydrological drought based in SPI and SDI index in the Inaouen Basin (Northern Morocco). *Journal of Materials and Environmental Sciences*, 9(1), 219-227. <https://doi.org/10.26872/jmes.2018.9.1.25>
- Buzai, G., Cacace, G., Humacata, L., & Lanzelotti, S. (2015). *Teoría y métodos de la Geografía Cuantitativa. Libro 1: por una Geografía de lo real*.
- Celleri, R., Willems, P., Buytaert, W., & Feyen, J. (2007). Space–time rainfall variability in the Paute basin, Ecuadorian Andes. *Hydrological Processes*, 21(24), 3316-3327. <https://doi.org/10.1002/hyp.6575>



- Centro de Cambio Global. (2009). Modelación hidrológica y de recursos hídricos de la cuenca del río Paute. Santiago: Universidad Católica de Chile.
- Curi Tapahuasco, S. (2017). Caracterización de de las sequías hidrológicas en la vertiente peruana del Océano Pacífico. *Universidad Nacional Agraria La Molina*. Recuperado de <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/2803>
- Dutta, D., Kundu, A., Patel, N. R., Saha, S. K., & Siddiqui, A. R. (2015). Assessment of agricultural drought in Rajasthan (India) using remote sensing derived Vegetation Condition Index (VCI) and Standardized Precipitation Index (SPI). *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 18(1), 53-63. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2015.03.006>
- Esquivel, G., Hurtado, P., Sánchez, I., & Velásquez, M. (2014). *EVALUACIÓN DEL INDICE DE SEQUÍA DE CAUDALES EN CUENCAS DEL NORTE-CENTRO DE MÉXICO*. 8.
- Forchhammer, M. C., & Post, E. (2004). Using large-scale climate indices in climate change ecology studies. *Population Ecology*, 46(1), 1-12. <https://doi.org/10.1007/s10144-004-0176-x>
- Grinsted, A., Moore, J. C., & Jevrejeva, S. (2004). Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 11(5/6), 561-566. <https://doi.org/10.5194/npg-11-561-2004>
- Grubbs, F. E. (1969). Procedures for Detecting Outlying Observations in Samples. *Technometrics*, 11(1), 1-21. <https://doi.org/10.1080/00401706.1969.10490657>
- Guevara, J. (2014). Uso correcto de la correlación cruzada en Climatología: el caso de la presión atmosférica entre Taití y Darwin. *Terra*, 30(47), 79-102.
- Hoorelbeke, R., Calvez, R., Pombosa, R., Roura, J., García, F., & Tejada, M. (2000). Modelización hidrológica en la cuenca del río Paute.
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., & Ferreira, L. G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83(1), 195-213. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2)



- Huete, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25(3), 295-309. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X)
- Iniyán, S., Goic, R., & Vijayavenkataraman, S. (2012). A review of climate change, mitigation and adaptation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 878-897. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.009>
- Iniyán, S., Goic, R., & Vijayavenkataraman, S. (2012). A review of climate change, mitigation and adaptation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 878-897. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.009>
- Jacobi, J., Perrone, D., Duncan, L. L., & Hornberger, G. (2013). A tool for calculating the Palmer drought indices: Technical Note. *Water Resources Research*, 49(9), 6086-6089. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20342>
- Kogan, F. N. (2001). Operational Space Technology for Global Vegetation Assessment. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82(9), 1949-1964. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(2001\)082<1949:OSTFGV>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(2001)082<1949:OSTFGV>2.3.CO;2)
- Kogan, F. (2011). ENSO Impact on Vegetation. En F. Kogan, A. Powell, & O. Fedorov (Eds.), *Use of Satellite and In-Situ Data to Improve Sustainability* (pp. 165-171). Springer Netherlands.
- Lavado, W., & Espinoza, J. C. (2014). Impactos de El Niño y La Niña en las lluvias del Perú (1965-2007). *Revista Brasileira de Meteorologia*, 29(2), 171-182. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862014000200003>
- Lin, Q., Wu, Z., Singh, V. P., Sadeghi, S. H. R., He, H., & Lu, G. (2017). Correlation between hydrological drought, climatic factors, reservoir operation, and vegetation cover in the Xijiang Basin, South China. *Journal of Hydrology*, 549, 512-524. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.04.020>
- Liu, W. T., & Kogan, F. N. (1996). Monitoring regional drought using the Vegetation Condition Index. *International Journal of Remote Sensing*, 17(14), 2761-2782. <https://doi.org/10.1080/01431169608949106>



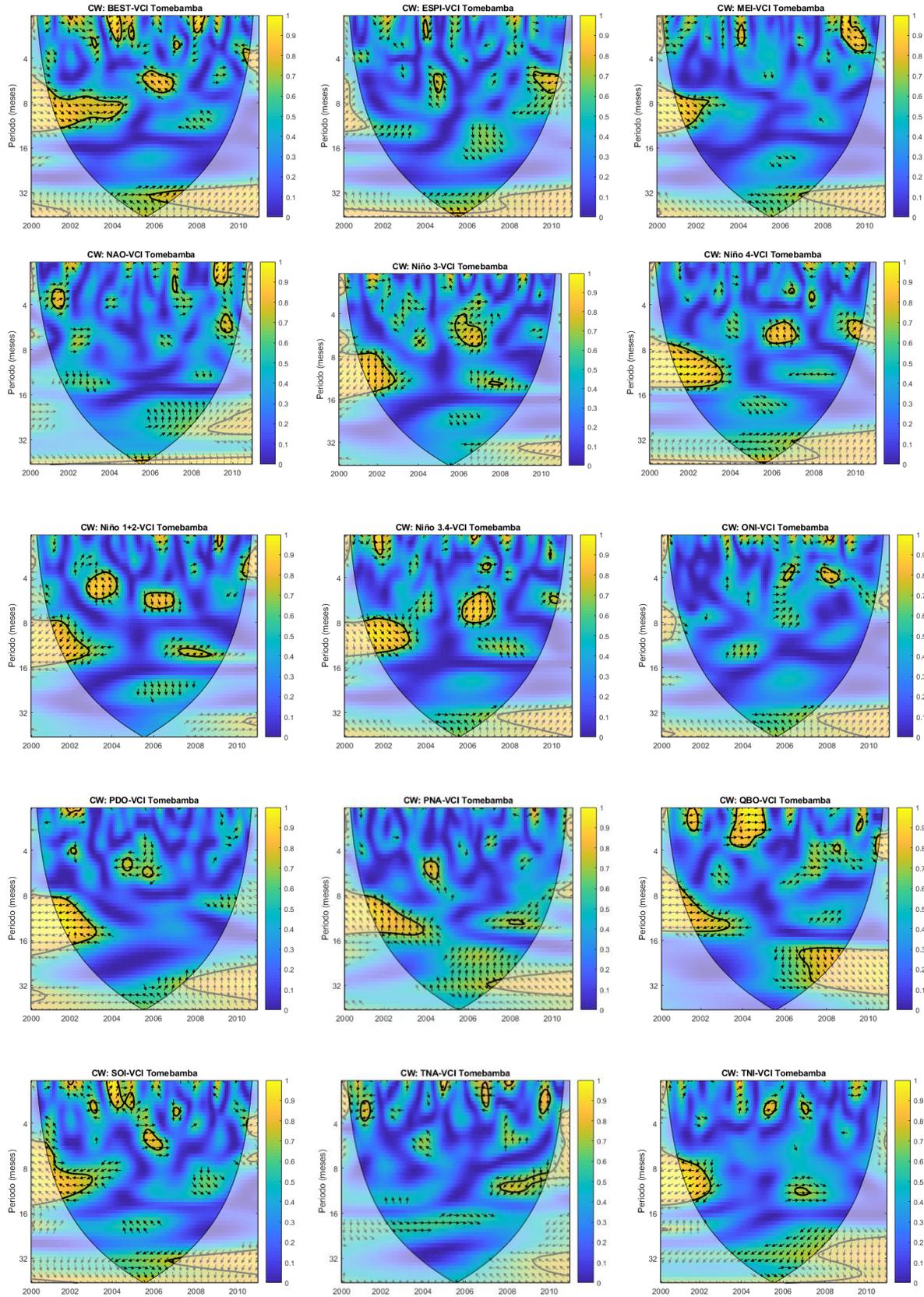
- Llerena, V., & Carolina, E. (2014). *Análisis de las crecidas presentadas en los ríos Tarqui, Yanuncay y Tomebamba desde 1997 hasta 2011*. Recuperado de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/5494>
- MathWorks. (2016). Wavelet coherence and cross-spectrum. Recuperado 17 de abril de 2019, de <https://es.mathworks.com/help/wavelet/ref/wcoherence.html>
- Méndez, J., Ramírez, A., Cornejo, E., Zárate, A., & Cavazos, T. (2010). Teleconexiones de la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) a la precipitación y temperatura en México. *Investigaciones geográficas*, (73), 57-70.
- Misiti, M. (Ed.). (2007). *Wavelets and their applications*. London ; Newport Beach, CA: ISTE.
- Montalván, M. (2018). Análisis de las relaciones entre la precipitación, vegetación y el fenómeno ENOS en las subcuencas Machángara y Tomebamba del río Paute. Recuperado de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/30598>
- Pacheco, J., Parra, N., & Avilés, A. (2017). Análisis de la sequía en la cuenca del Paute mediante el índice de precipitación estandarizado (SPI). *Memorias Universidad del Azuay*, (XVI), 41-49.
- Rincón, J., Merchán, D., Sparer, A., Rojas, D., & Zarate, E. (2017). La descomposición de la hojarasca como herramienta para evaluar la integridad funcional de ríos altoandinos del sur del Ecuador. *Revista de Biología Tropical*, 65(1), 321-334.
- Rivera, J., & Penalba, O. (2018). *Distribución de probabilidades de los caudales mensuales en las regiones de Cuyo y Patagonia (Argentina). Aplicación al monitoreo de sequías hidrológicas* (Vol. 43).
- Rojas, S., & Melchor, J. (2016). Impacto del cambio del uso de suelo sobre la calidad del agua del río Tomebamba. Recuperado de <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/6481>
- Roldán, P. A., & Poveda, G. (2006). *Variabilidad espacio-temporal de los índices NDVI y EVI. Aplicación a cinco regiones Colombianas* (Vol. 10).

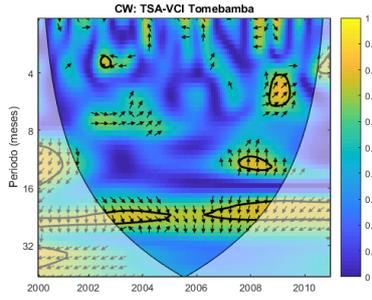


- Tallaksen, L. M., & Van Lanen, H. (2004). *Hydrological Drought: Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater*.
- Torrence, C., & Compo, G. P. (1998). A Practical Guide to Wavelet Analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79(1), 18.
- Trejo, F. J. P., Barbosa, H. A., Ruiz, I. Q., & Peñaloza-Murillo, M. A. (2016). Patrones de Circulación Atmosféricos-Oceánicos a Meso-Escala Vinculados a las Sequías Severas y Extensas en Venezuela. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 31(4), 468-489. <https://doi.org/10.1590/0102-778631231420150070>
- Tullot, I. F. (2000). *Climatología de España y Portugal*. Universidad de Salamanca.
- Valiente, O. M. (2001). Sequía: definiciones, tipologías y métodos de cuantificación. *Investigaciones geográficas*, (26), 59-80.
- Van Loon, A. F., & Laaha, G. (2015). Hydrological drought severity explained by climate and catchment characteristics. *Journal of Hydrology*, 526, 3-14. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.10.059>
- Vicente-Serrano Sergio M., López-Moreno Juan I., Beguería Santiago, Lorenzo-Lacruz Jorge, Azorin-Molina Cesar, & Morán-Tejeda Enrique. (2012). Accurate Computation of a Streamflow Drought Index. *Journal of Hydrologic Engineering*, 17(2), 318-332. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000433](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000433)
- Winkler, K., Gessner, U., & Hochschild, V. (2017). Identifying Droughts Affecting Agriculture in Africa Based on Remote Sensing Time Series between 2000–2016: Rainfall Anomalies and Vegetation Condition in the Context of ENSO. *Remote Sensing*, 9(8), 831. <https://doi.org/10.3390/rs9080831>
- Zhiña Villa, X. (2016). *Pronóstico de sequías - caso de estudio en la cuenca del río Machángara*. Recuperado de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/23846>

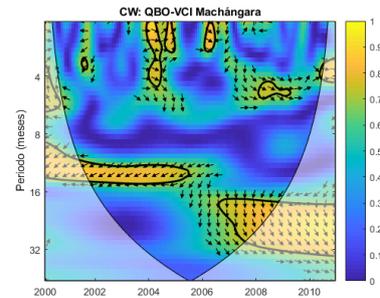
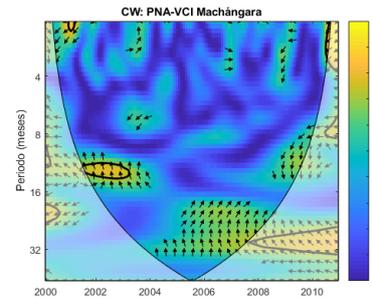
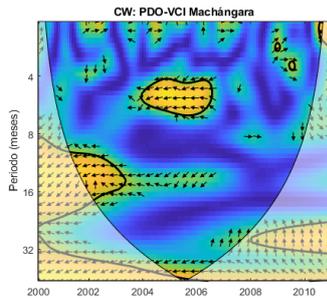
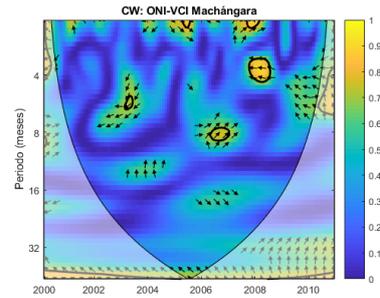
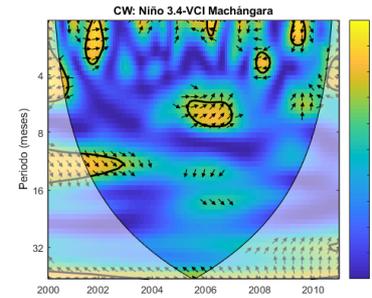
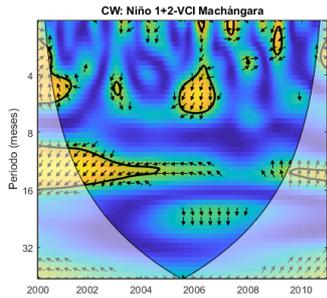
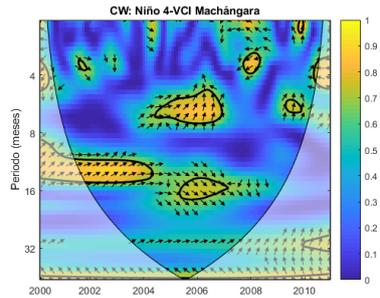
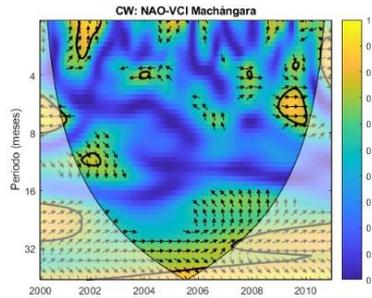
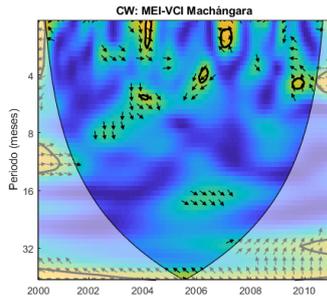
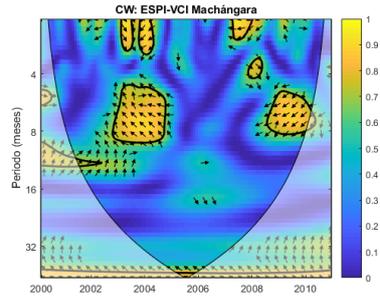
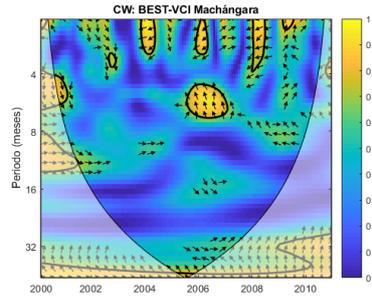
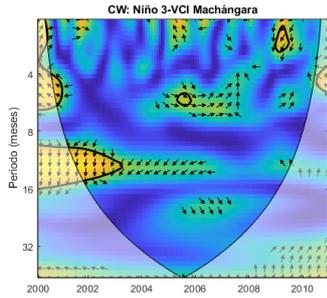
6. ANEXOS

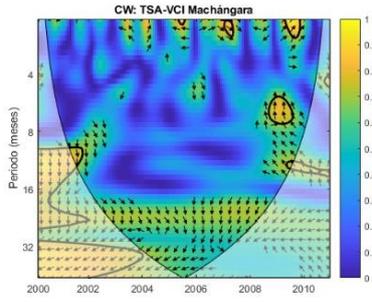
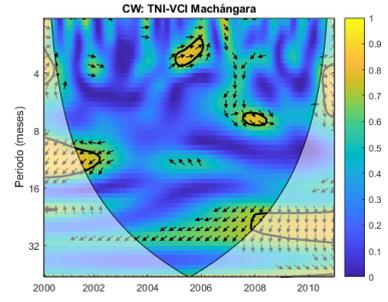
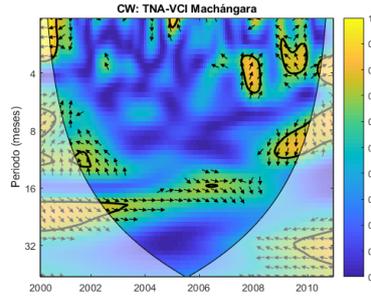
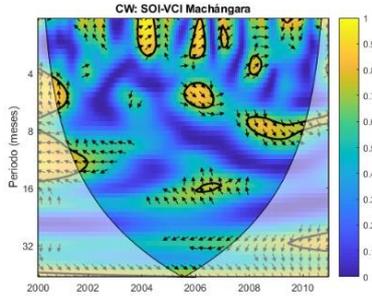
Anexo 1. Coherencia Wavelet VCI Tomebamba & Índices Climáticos.





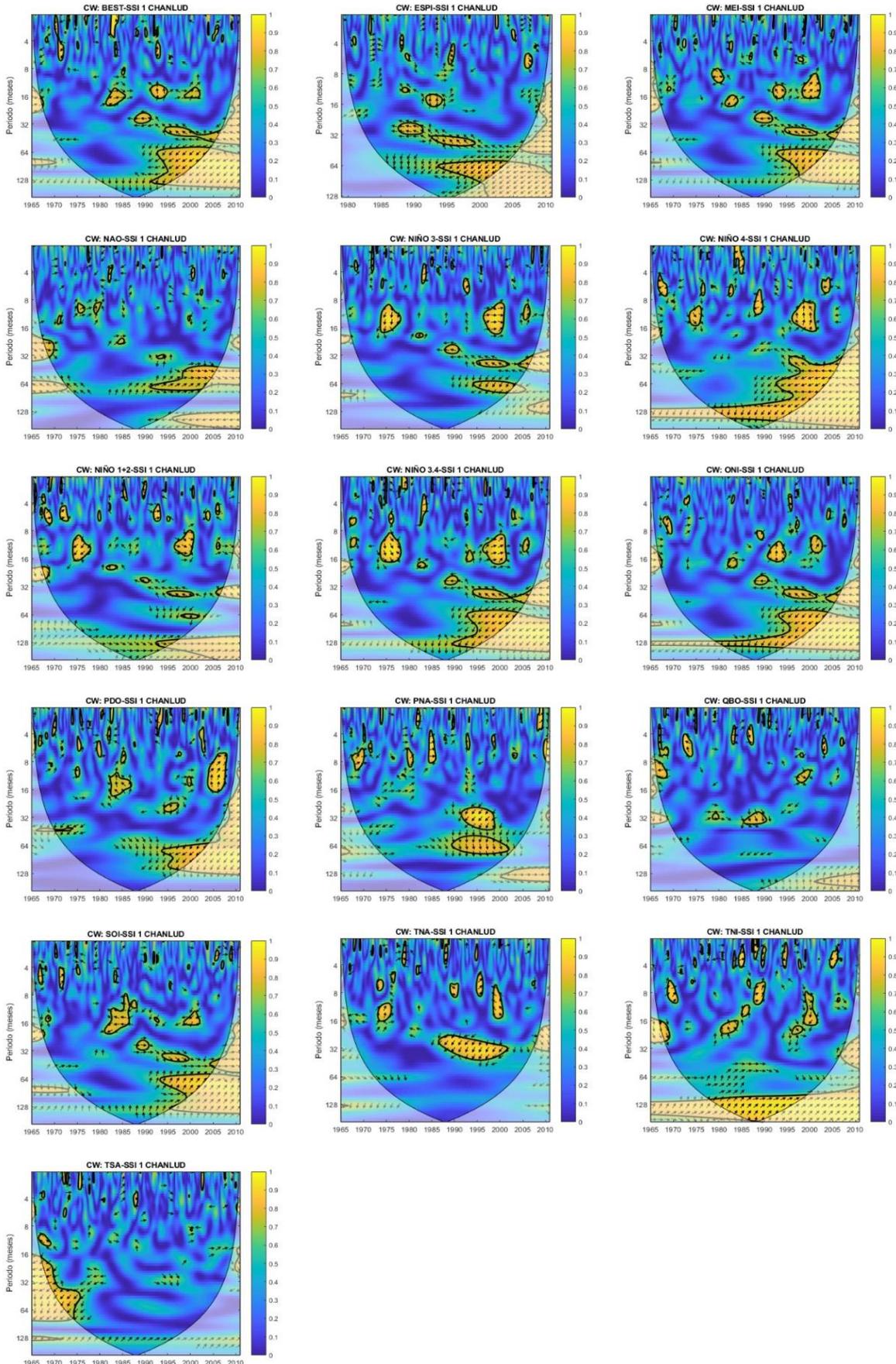
Anexo 2. Coherencia Wavelet VCI Machángara & Índices Climáticos.



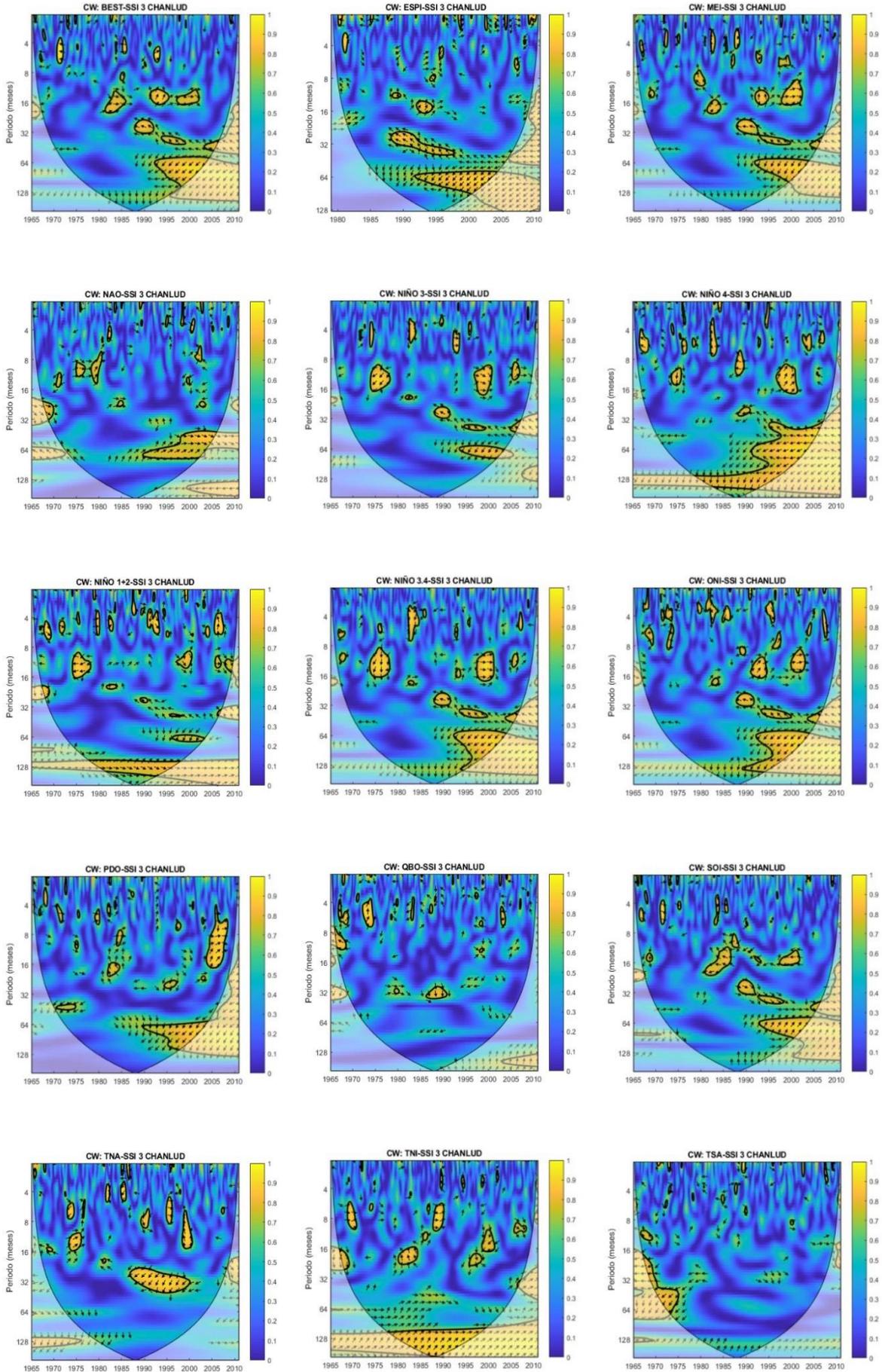


Anexo 3. Coherencia Wavelet SSI Machángara & Índices Climáticos.

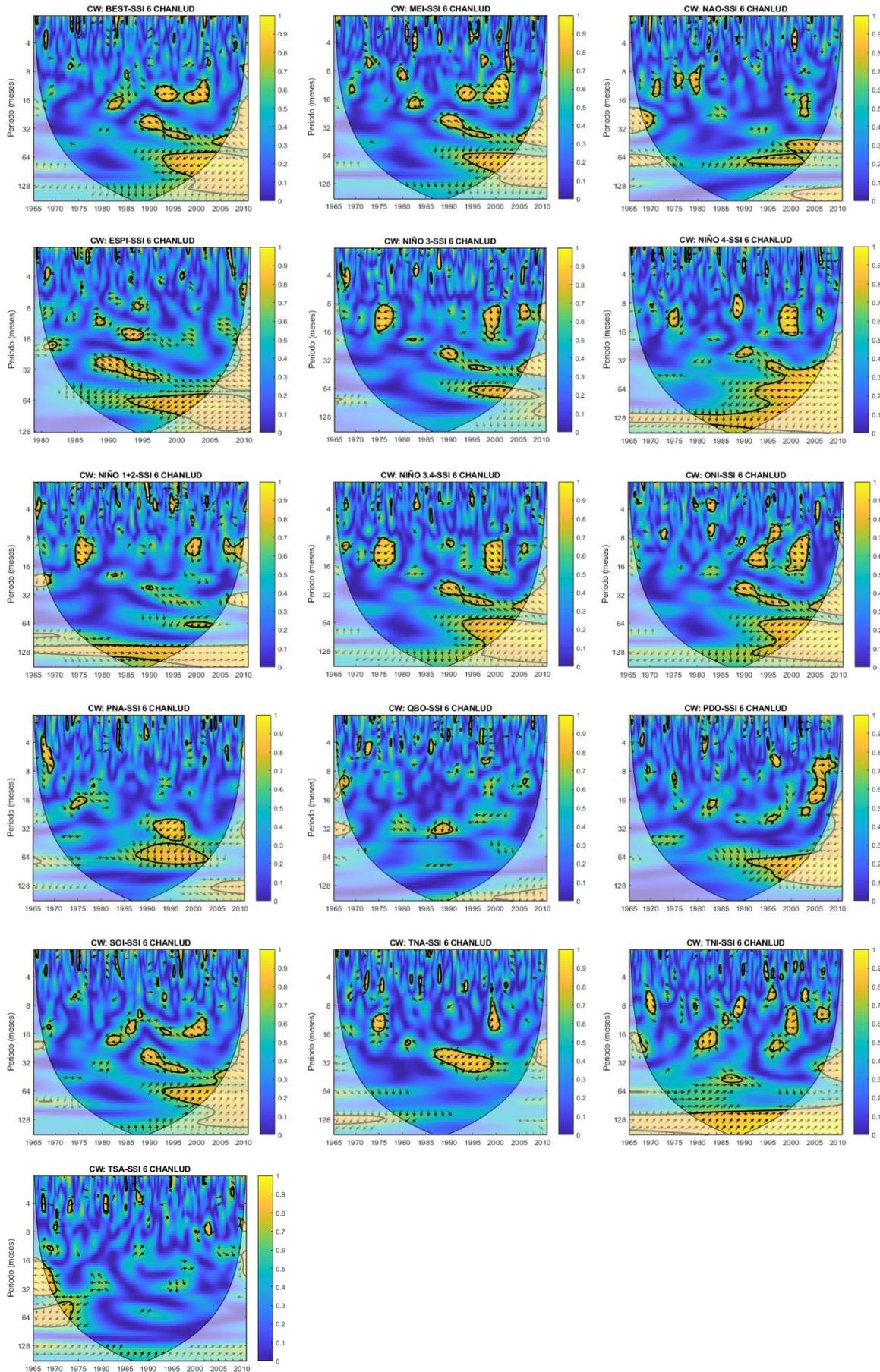
SSI 1 CHANLUD



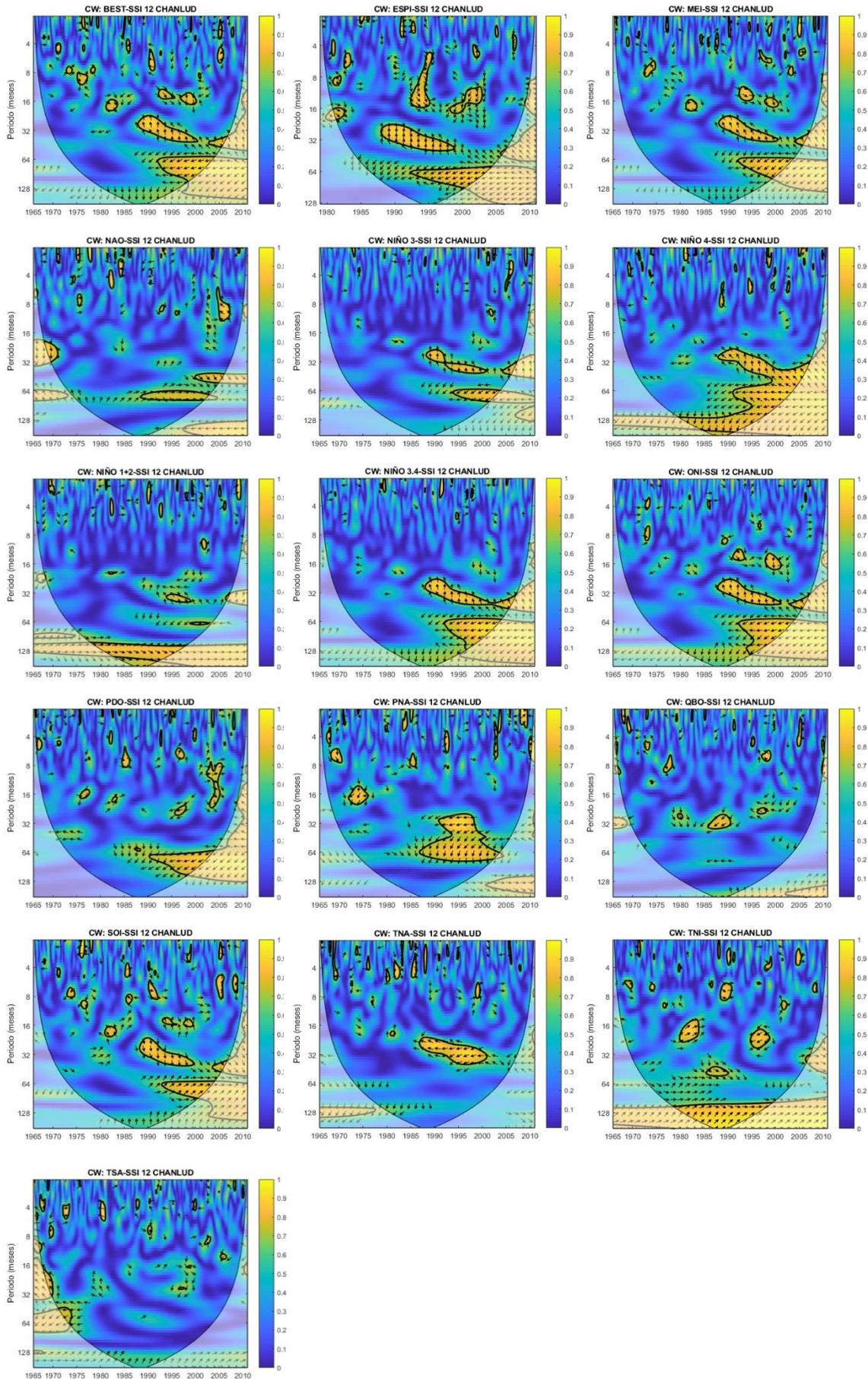
SSI 3 CHANLUD



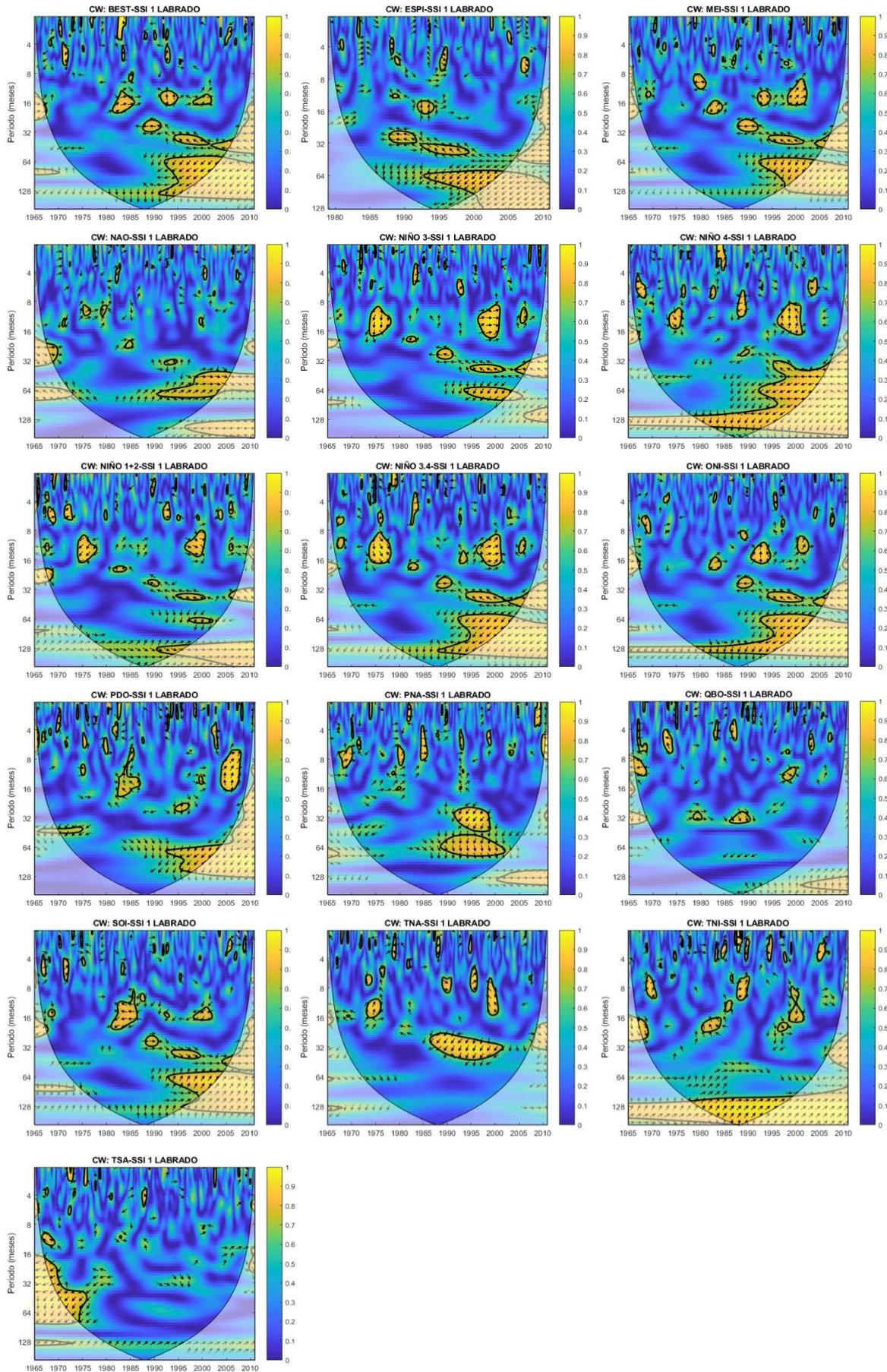
SSI 6 CHANLUD



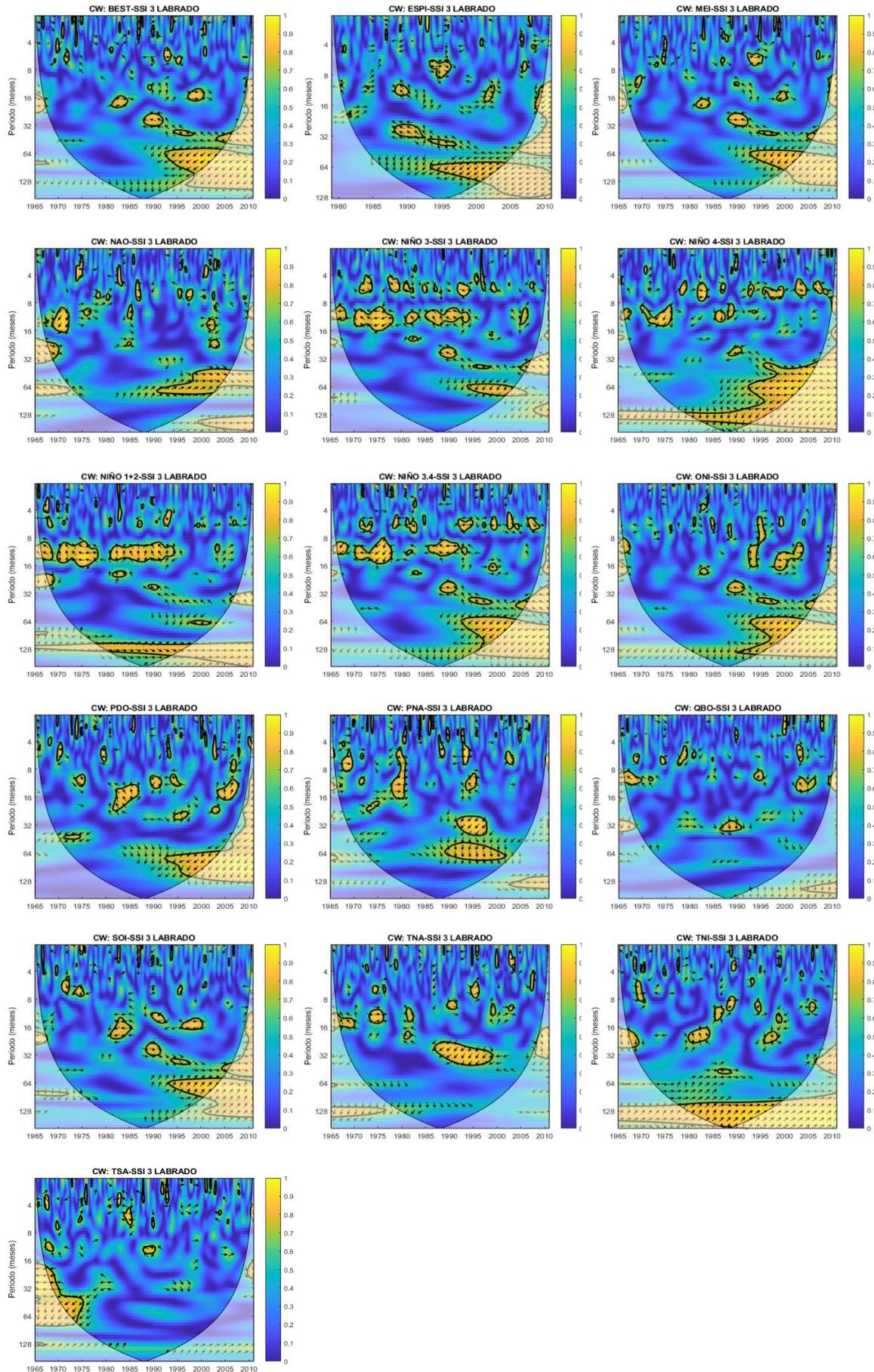
SSI 12 CHANLUD



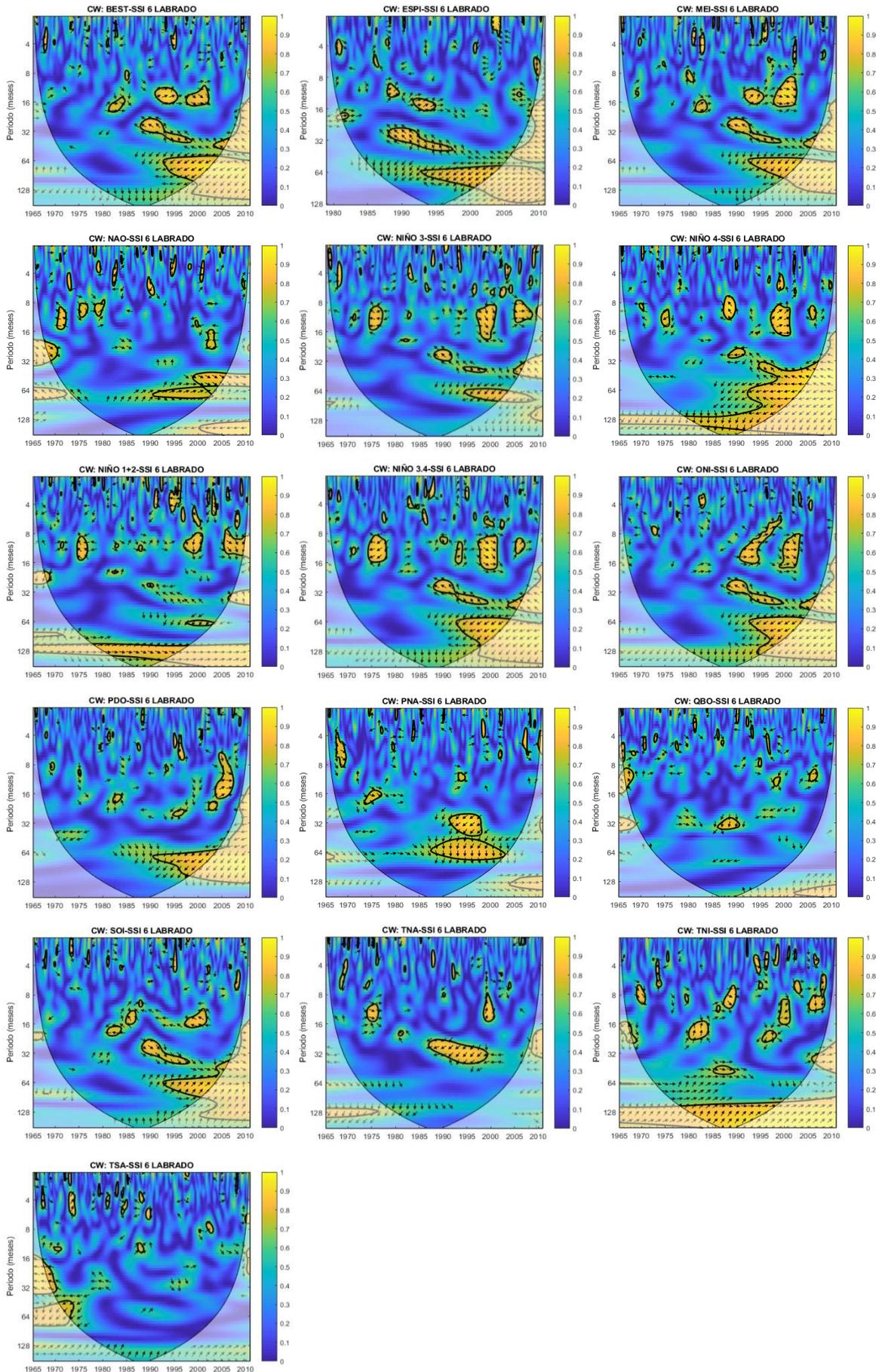
SSI 1 LABRADO



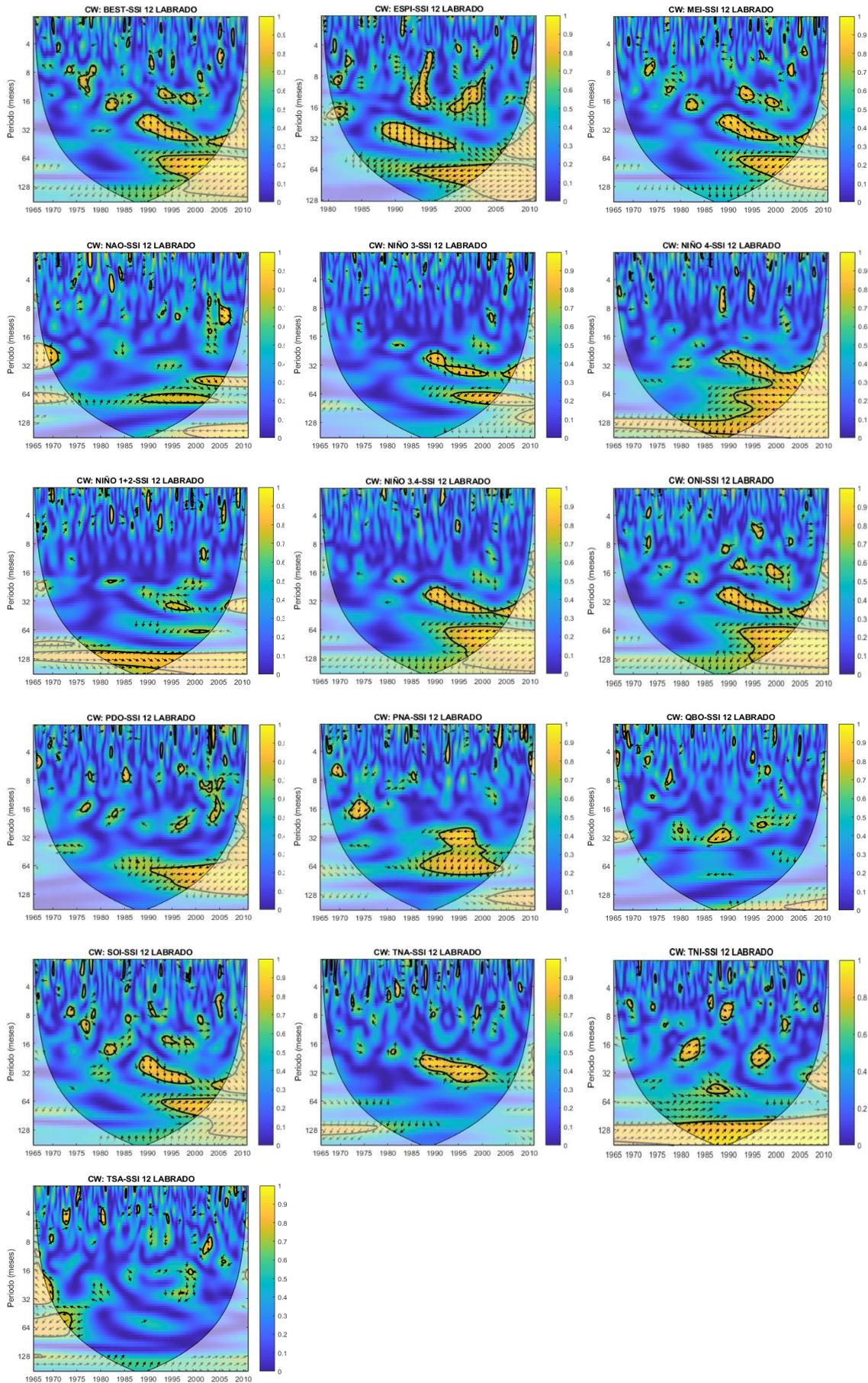
SSI 3 LABRADO



SSI 6 LABRADO

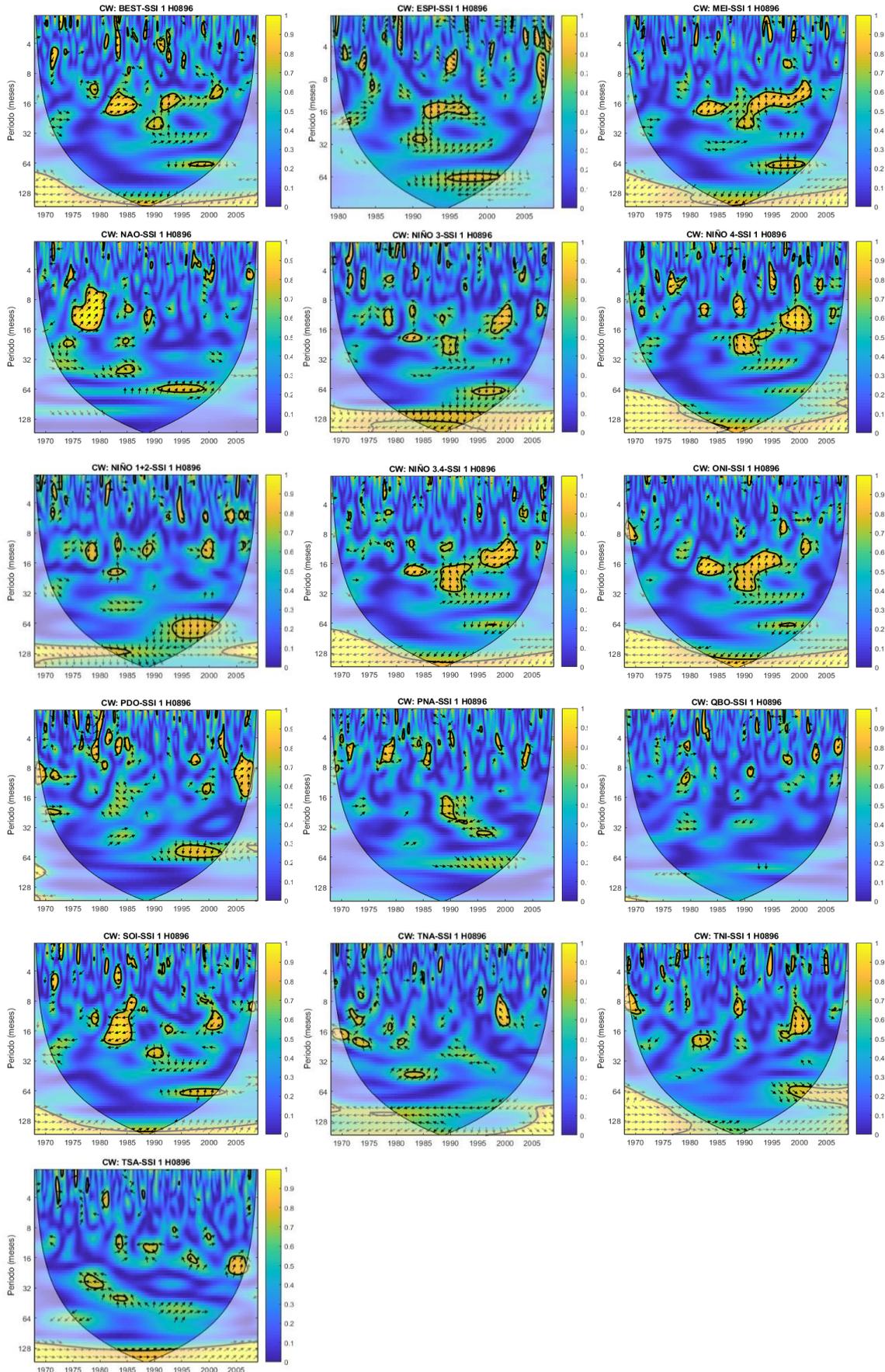


SSI 12 LABRADO

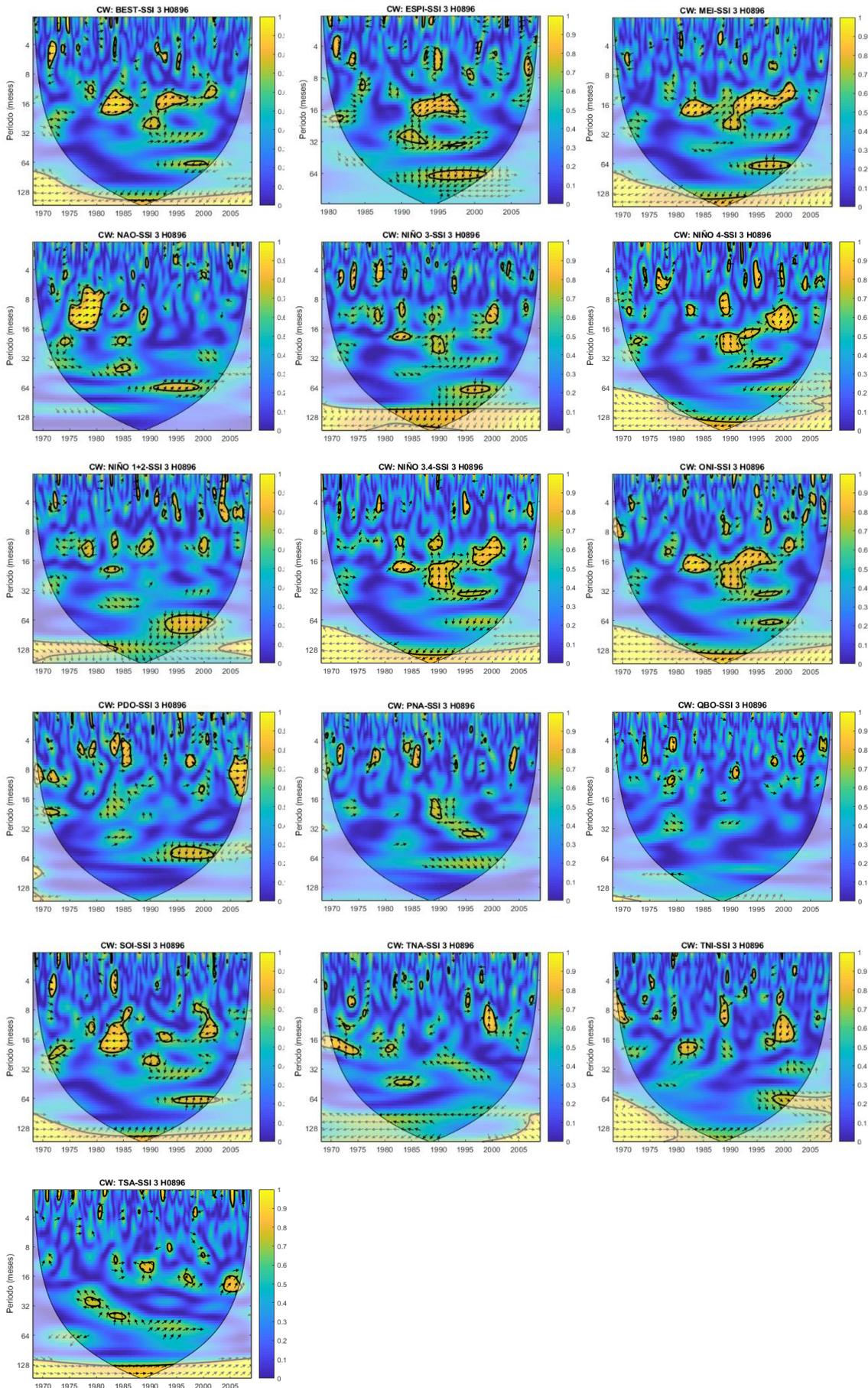


Anexo 4 Coherencia Wavelet SSI Tomebamba & Índices Climáticos.

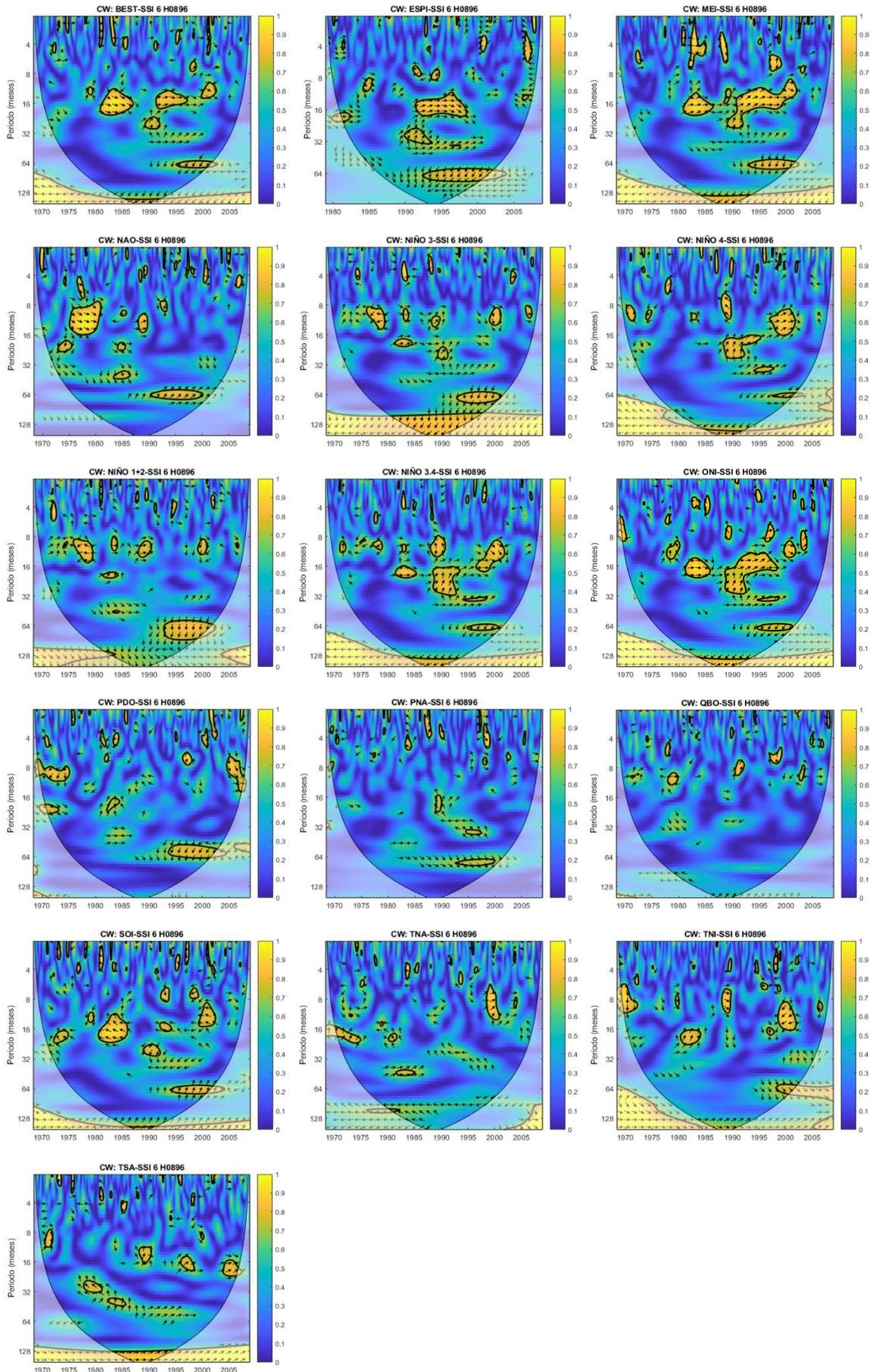
SSI 1 MATADERO EN SAYAUSÍ



SSI 3 MATADERO EN SAYAUSÍ



SSI 6 MATADERO EN SAYAUSÍ



SSI 12 MATADERO EN SAYAUSÍ

