

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CENTRO DEL PERÚ

ESCUELA DE POSGRADO

**UNIDAD DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES Y DEL
AMBIENTE**



TESIS

**Predicción de Sequías Mediante Modelos de Cópulas
y Datos Hidrometeorológicos en la Región Sur del
Perú, 2024**

PRESENTADA POR:

Virgilio Arriaga Gómez

PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:

MAESTRO EN GESTIÓN SOSTENIBLE DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS

Huancayo – Perú

2025

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes

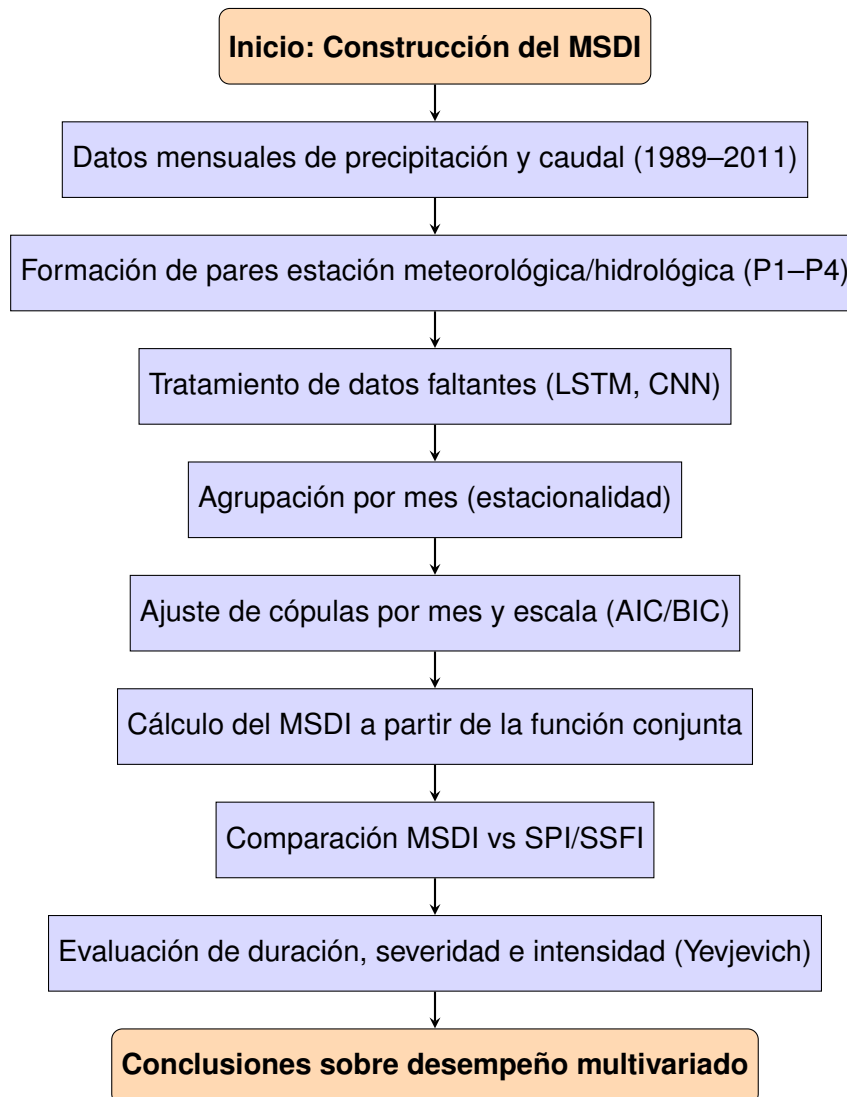
1.1.1. Antecedentes Internacionales

Terzi y Önöz (2025) llevaron a cabo un estudio en la cuenca del río Ceyhan (CRB), situada en el sur de Turquía, una región particularmente expuesta a la variabilidad climática y con alta dependencia de los recursos hídricos para la agricultura, la industria y el consumo urbano. La investigación propuso una metodología innovadora para el cálculo del Índice Multivariado Estandarizado de Sequía (MSDI), con el fin de mejorar la detección y evaluación de sequías meteorológicas e hidrológicas de forma integrada. El enfoque se basó en el uso dinámico de cópulas estadísticas, seleccionadas mensualmente según criterios de ajuste óptimo (AIC y BIC), permitiendo modelar la dependencia entre variables hidrometeorológicas con sensibilidad estacional.

Los datos utilizados abarcaron series mensuales de precipitación y caudal entre 1989 y 2011, recopilados en cuatro pares de estaciones meteorológicas e hidrológicas. La metodología comparó el rendimiento del MSDI frente a índices tradicionales como el SPI y el SSFI, evidenciando diferencias sustanciales. Mientras los índices univariados identificaron solo cuatro eventos principales de sequía, el MSDI detectó ocho, lo que demuestra su capacidad para reconocer eventos combinados y capturar condiciones de sequía simultáneas que de otro modo podrían pasar desapercibidas. Particularmente, la sequía del periodo 2007–2009 fue clasificada como la más severa por el MSDI en tres de los cuatro pares de estaciones, superando la capacidad de los índices clásicos para reflejar su intensidad real. Además, varios episodios que fueron considerados de severidad moderada por SPI o SSFI fueron reclasificados como severos al integrar ambas variables en el MSDI.

Las conclusiones del estudio resaltan que el uso del MSDI con selección mensual de cópulas incrementa significativamente la precisión y sensibilidad del monitoreo de sequías. Esta herramienta proporciona una representación más realista y robusta de las condiciones hidrometeorológicas extremas, facilitando la formulación de estrategias de gestión hídrica y planificación de recursos en territorios complejos como la CRB. La investigación sugiere que

este enfoque es transferible a otras regiones con similar variabilidad climática y dependencia hídrica, y plantea como línea futura la incorporación de indicadores agrícolas para expandir el análisis hacia una perspectiva aún más integral.



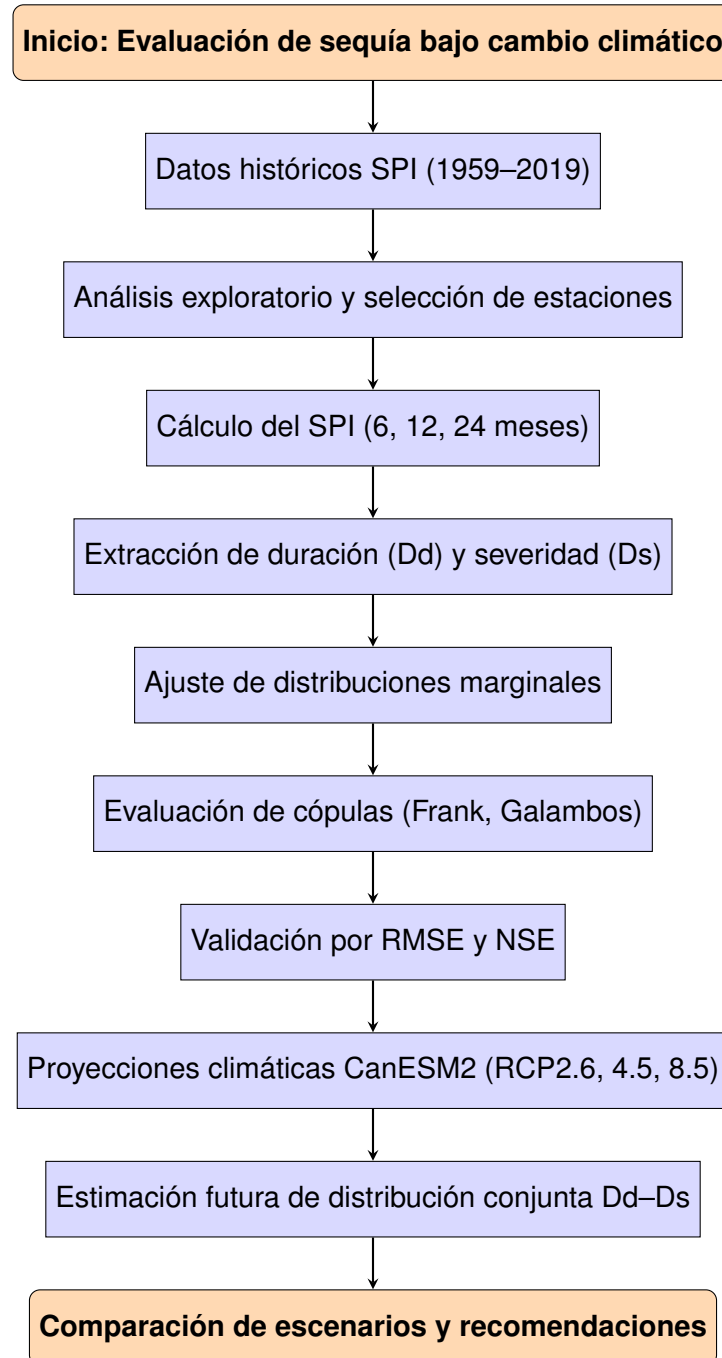
Samadian et al. (2024) llevaron a cabo una investigación titulada “*Joint analysis of drought affected by climate change in Zarinehrood watershed, Iran, using copula functions*”, centrada en la cuenca del río Zarinehrood, una subcuenca esencial del lago Urmia ubicada en el noroeste de Irán. El objetivo del estudio fue evaluar la frecuencia conjunta de características de sequía meteorológica —específicamente su duración y severidad— tanto en el pasado como en escenarios climáticos futuros, mediante el uso de funciones cópula. La investigación, de naturaleza cuantitativa y no experimental, se apoyó en análisis estadístico

multivariado y simulaciones climáticas derivadas del modelo CanESM2 bajo los escenarios RCP2.6, RCP4.5 y RCP8.5, abarcando el periodo 2020–2100.

Se empleó el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI) en escalas de 6, 12 y 24 meses, calculado a partir de datos históricos (1959–2019) obtenidos de tres estaciones meteorológicas: Miandoab, Saqez y Tekab. Las variables de duración (Dd) y severidad (Ds) de la sequía se analizaron conjuntamente utilizando cópulas bivariadas, entre las que destacaron las familias Frank y Galambos como las más representativas, seleccionadas mediante criterios de ajuste como RMSE y NSE.

Los resultados en el periodo base revelaron que alrededor del 45 % de los meses presentaron déficit de precipitación ($SPI < 0$), y aproximadamente el 8 % calificaron como sequías severas ($SPI < -1.5$). En los análisis futuros, el escenario RCP8.5 mostró una reducción proyectada de precipitación entre 36 % y 42 %, junto con un incremento significativo en la probabilidad de eventos de sequía más prolongados e intensos en comparación con el escenario optimista RCP2.6. Por ejemplo, para un evento con severidad $SPI = -1$, la duración esperada en el escenario RCP2.6 fue de aproximadamente 5.5 a 6.7 meses, mientras que en RCP8.5 aumentó hasta 8 meses en las mismas condiciones de probabilidad.

La investigación concluyó que el análisis conjunto de duración y severidad mediante cópulas ofrece una representación más realista del riesgo de sequía que los enfoques univariados tradicionales. Además, los resultados sugieren que, de mantenerse la tendencia actual de emisiones sin estrategias efectivas de mitigación, la región podría enfrentar sequías más frecuentes, extensas y severas. Esta metodología resulta valiosa para fundamentar políticas de planificación hídrica adaptativa, especialmente en regiones vulnerables como la cuenca del lago Urmia.



Esit y Yuce (2023) realizaron un estudio titulado “*Copula-based bivariate drought severity and duration frequency analysis considering spatial–temporal variability in the Ceyhan Basin, Turkey*”, centrado en la cuenca del río Ceyhan, una región del sureste de Turquía caracterizada por un clima mediterráneo con marcada variabilidad espacial y altitudinal. El propósito de la investigación fue evaluar la frecuencia conjunta de la duración y la severi-

dad de las sequías meteorológicas, utilizando para ello funciones de cópulas bivariadas que permitieran reflejar la complejidad estadística de estos eventos, así como sus variaciones según la altitud (zonas altas, medias y bajas de la cuenca).

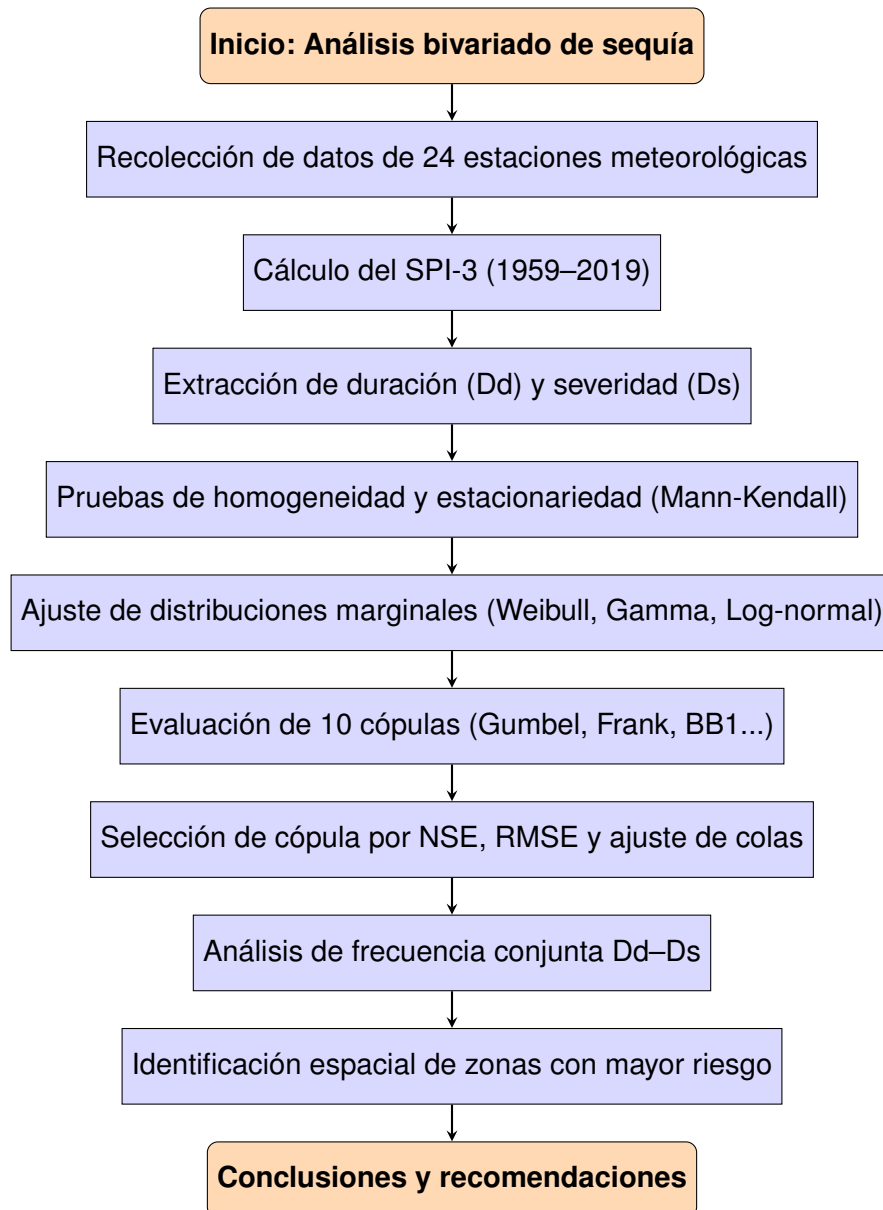
El estudio adoptó un enfoque cuantitativo, de tipo básico y diseño no experimental, basado en el análisis estadístico multivariado. Se utilizaron registros mensuales de precipitación procedentes de 24 estaciones meteorológicas distribuidas estratégicamente a lo largo de la cuenca, seleccionadas mediante un muestreo no probabilístico basado en criterios geográficos y de altitud. Para la identificación de eventos de sequía se empleó el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI) a una escala temporal de 3 meses (SPI-3), calculando como atributos principales la *duración* —número de meses consecutivos con valores SPI negativos— y la *severidad* —suma acumulada de dichos valores durante cada evento—.

En la etapa preliminar, se aplicaron las pruebas de Mann–Kendall y Spearman Rho para verificar la homogeneidad y la estacionariedad de las series. Luego, se ajustaron distribuciones marginales para las variables de interés (duración y severidad), seleccionando aquellas con mejor desempeño según criterios de bondad de ajuste (AIC, BIC, log-verosimilitud), destacándose las distribuciones Weibull, Gamma y Log-normal como las más adecuadas según la estación y la altitud correspondiente.

Posteriormente, se evaluaron diez familias de cópulas bivariadas —entre ellas Gumbel, Clayton, Frank, BB1, BB6 y BB7— para modelar la dependencia entre las variables. La elección de la mejor cópula para cada estación se basó en criterios de ajuste estadístico y en la capacidad de capturar la dependencia en colas (tail dependence). Las cópulas Gumbel y BB1 demostraron ser las más robustas para representar la relación entre severidad y duración de las sequías.

Los resultados revelaron una clara distribución espacial del riesgo: las zonas meridionales de la cuenca presentaron mayores niveles de riesgo (es decir, menores periodos de retorno conjuntos), mientras que las regiones septentrionales mostraron menor exposición. Por ejemplo, en una estación de altitud media, el periodo de retorno conjunto T_{DS} —representando sequías simultáneamente prolongadas e intensas— fue de aproximadamente 137.9 años, mientras que el periodo de retorno alternativo T'_{DS} —que representa la ocurrencia de al menos una de las dos condiciones— fue de 78.4 años, en contraste con un periodo de retorno de 100 años estimado mediante análisis univariado.

En conclusión, Esit y Yuce Esit y Yuce (2023) demostraron que el enfoque bivariado basado en cópulas proporciona una caracterización más completa y precisa del riesgo de sequía en comparación con los métodos tradicionales univariados. Además, permite integrar de manera explícita la influencia de la altitud en la modelación de eventos extremos, lo cual resulta especialmente útil para la toma de decisiones en planificación hídrica, agrícola y energética en zonas propensas a sequías recurrentes.



1.1.2. Antecedentes Nacionales

En el estudio de W. J. Cabrera (2023), cuyo título es *Modelamiento de sequías agrícolas en la región sur del Perú mediante el uso de funciones cópula*, se planteó como objetivo modelar la incidencia de las sequías agrícolas en la cuenca alta de los ríos Locumba y Caplina utilizando funciones multivariadas de distribución de probabilidad, conocidas como cópulas. La investigación, de enfoque aplicado y cuantitativo, inició con la evaluación del impacto del Fenómeno del Niño-Oscilación del Sur (ENOS), la temperatura del aire y la temperatura de la superficie del mar (TSM) en varias zonas ENSO sobre la ocurrencia de sequías agrícolas. Los resultados iniciales mostraron correlaciones bajas con los índices ENSO, por lo que se optó por utilizar la TSM en la zona 1+2 (TSM1+2) y la temperatura del aire (T) debido a su correlación media. Mediante la prueba estadística de Cramer Von Mises, se determinó que la cópula t-Student es la más adecuada para representar la relación entre los índices SPI3 y EMI, mientras que la cópula Frank fue más apropiada para modelar las relaciones entre SPI3 y la temperatura del aire, así como entre SPI3 y TSM1+2. Finalmente, se construyó una cópula tridimensional para estimar la probabilidad conjunta de ocurrencia de sequías extremas, concluyéndose que estas son más frecuentes bajo temperaturas del aire entre 10°C y 12°C y temperaturas de la superficie del mar en la zona 1+2 entre 24°C y 26°C.

Por otro lado, J. Cabrera et al. (2021) realizaron un análisis sobre la variabilidad espaciotemporal de las sequías en el Perú y su relación con el riesgo asociado al Fenómeno del Niño. Este estudio, de carácter aplicado y enfoque cuantitativo, utilizó series de datos climatológicos e hidrológicos para evaluar la frecuencia, duración e intensidad de las sequías. Los hallazgos revelaron variaciones significativas en el comportamiento espacial y temporal de estos eventos, confirmando que el Fenómeno del Niño incrementa considerablemente el riesgo de sequías en diversas regiones del país. Estos resultados son esenciales para mejorar la gestión de los recursos hídricos y desarrollar estrategias de mitigación efectivas.

Asimismo, en el estudio de J. W. Cabrera (2019), se planteó como objetivo analizar la relación entre la ocurrencia de sequías y el fenómeno ENSO en el sur del Perú, aplicando un enfoque basado en cópulas. La metodología incluyó el uso de funciones cópula para modelar la dependencia no lineal entre las condiciones de sequía y los eventos de ENSO, permitiendo capturar la complejidad de estas interacciones climáticas. Los resultados evidenciaron

una correlación significativa entre las sequías en el sur del Perú y la fase de ENSO, demostrando que el uso de cópulas mejora la capacidad predictiva y ayuda a gestionar los riesgos climáticos en regiones vulnerables a eventos extremos.

Finalmente, Vega-Jácome (2016) se propuso evaluar el riesgo de sequías en el sur del Perú, basándose en la estimación del peligro y la vulnerabilidad a estos eventos. La metodología incluyó el uso de la base de datos PISCO V1.1 del SENAMHI, que contiene datos de precipitación grillada, junto con información espacial sobre factores físicos, ambientales y socioeconómicos. Para estimar el peligro de sequías, se desarrolló el Índice de Peligro de Sequías (DHI) mediante un análisis bivariado de la duración y severidad de estos eventos. La vulnerabilidad se determinó considerando variables como la elevación, pendiente, uso del suelo, textura del suelo, disponibilidad de presas de agua, distancia a ríos, densidad poblacional e Índice de Desarrollo Humano (IDH). Como resultado, se generaron mapas de peligro, vulnerabilidad y riesgo de sequías para la región sur del Perú, identificándose 24 distritos con riesgo de sequías muy alto y 210 distritos con riesgo alto en los 11 departamentos estudiados (Lima, Apurímac, Ayacucho, Arequipa, Cusco, Huancavelica, Ica, Junín, Moquegua, Puno y Tacna). Este estudio destaca la importancia de adoptar un enfoque integral para evaluar y gestionar los riesgos de sequía en una región altamente vulnerable.

BIBLIOGRAFÍA

- Cabrera, J., Mejía, J., & Guevara-Pérez, E. (2021). Modelación probabilística de la relación entre ENSO y sequías agrícolas en el sur de Perú. *Revista Ingeniería UC*, 28(1), 59-68. <https://doi.org/10.54139/revinguc.v28i1.13>
- Cabrera, J. W. (2019). Relación entre la ocurrencia de sequía y el fenómeno Enso en el sur del Perú: un análisis de cópulas. *38th IAHR World Congress*, 3750-3756. <https://doi.org/10.3850/38WC092019-0161>
- Cabrera, W. J. (2023). *Modelamiento de sequías agrícolas en la región sur del Perú mediante el uso de funciones cópula* [Tesis doctoral, Universidad Nacional Agraria La Molina]. <https://repositorio.senamhi.gob.pe/item/07>
- Esit, M., & Yuce, M. I. (2023). Copula-based bivariate drought severity and duration frequency analysis considering spatial-temporal variability in the Ceyhan Basin, Turkey. *Theoretical and Applied Climatology*, 151, 1113-1131. <https://doi.org/10.1007/s00704-022-04317-9>
- Samadian, M., Asadi, E., Ghorbani, M. A., & Ahmadi, F. (2024). Joint analysis of drought affected by climate change in Zarinerood watershed, Iran, using copula functions. *Acta Geophysica*, 72, 3631-3645. <https://doi.org/10.1007/s11600-024-01306-6>
- Terzi, T. B., & Öñöz, B. (2025). Análisis avanzado de sequías mediante un nuevo índice multivariado basado en cópulas: un estudio de caso de la cuenca del río Ceyhan. *Sustainable Water Resources Management*, 11(11), 1-19. <https://doi.org/10.1007/s40899-025-01189-5>
- Vega-Jácome, F. (2016). *Análisis del riesgo de sequía en el sur del Perú* [Tesis doctoral, Universidad Nacional Agraria La Molina]. <https://hdl.handle.net/20.500.12542/108>

ANEXO A: [TÍTULO DEL ANEXO]