



Artículo

La variabilidad de la lluvia como punto de partida para la seguridad hidrológica de presas

Rainfall variability: a starting point for dam hydrological safety

USAC

CUNOR

Carrera de Geología

Recepción: 11/05/2025

Aceptado: 15/07/2025

Publicado: 24/11/2025

Juan Carlos Fuentes Montepeque (1)

Hugo Josué Salic Pozuelos (1)

(1) Instituto Nacional de Electrificación, 7ma Avenida 2-29 zona 9, Ciudad de Guatemala, Guatemala

jfuentes@inde.gob.gt | <https://orcid.org/0009-0005-0100-303X>hsalic@inde.gob.gt | <https://orcid.org/0009-0001-1221-2305>

Palabras clave:

Fenómeno de persistencia, intervalo de confianza, modulo hidrológico, proceso markoviano, redes de monitoreo.

Keywords:

mean annual flow, Markov processes, confidence intervals, persistence phenomena, monitoring networks

RESUMEN

Este estudio analiza la variabilidad de la lluvia como un factor crítico para la seguridad hidrológica de las presas, tomando como caso de referencia la parte alta de la cuenca hidrográfica del río Chixoy, una de las más relevantes para la generación hidroeléctrica en Guatemala. El estudio examina el comportamiento temporal y espacial de la lluvia y su relación directa con el régimen de escurrimiento superficial, elemento fundamental para la operación y estabilidad de la infraestructura hidráulica. A partir de la revisión y tratamiento de series históricas de lluvia y caudal, se evalúan sus principales propiedades estadísticas y la existencia de patrones de persistencia que reflejan la influencia de la variabilidad de la lluvia sobre el régimen hidrológico. Los hallazgos indican que las variaciones en la lluvia en el área de influencia de la cuenca del Chixoy inciden de manera directa en la regulación y disponibilidad del recurso hidráulico, afectando tanto los períodos de déficit como de exceso de lluvias. Este comportamiento responde a la interacción entre factores fisiográficos, geomorfológicos y de la dinámica en el uso de la tierra, que condicionan la respuesta del sistema frente a los diferentes regímenes de lluvia. Se resalta la importancia de analizar integralmente la relación entre la lluvia y el escurrimiento superficial, reconociendo los cambios temporales que pueden influir en la seguridad operativa y funcional de las presas. El estudio enfatiza la necesidad de incluir el componente de la variabilidad de la lluvia en los procesos de planificación, diseño y administración de las obras hidráulicas. Comprender estos procesos permite optimizar la gestión sostenible del agua, prevenir condiciones críticas y fortalecer la seguridad hidrológica como base técnica para la continuidad operativa, la eficiencia energética y la resiliencia en sistemas de aprovechamiento de los recursos hidráulicos.

Abstract

This study examines the role of rainfall variability as a critical factor in ensuring the hydrological safety of dams, using the upper watershed of the Chixoy river one of Guatemala's most important basins for hydroelectric generation—as a case study. The research focuses on the temporal and spatial behavior of precipitation and its direct influence on surface runoff regimes, which are fundamental to the operation, integrity, and long-term resilience of hydraulic infrastructure. Through the analysis of historical rainfall and streamflow time series, the study evaluates key statistical properties and identifies persistence patterns that underscore the influence of rainfall variability on hydrological dynamics. The results demonstrate that fluctuations in precipitation within the Chixoy river basin significantly affect both the regulation and availability of water resources, exacerbating conditions during both droughts and periods of excess rainfall. These dynamics are closely linked to the interplay between physiographic and geomorphological characteristics, as well as land use changes, all of which modulate the basin's hydrological response to varying precipitation patterns. The findings highlight the importance of adopting an integrated approach to the analysis of rainfall-runoff interactions, with particular attention to temporal variability, in order to inform the design, operation, and safety protocols of dam infrastructure. The study emphasizes the necessity of explicitly incorporating rainfall variability into the planning, design, and management frameworks of hydraulic works. A deeper understanding of these processes contributes to the development of sustainable water resource management strategies, enhances the capacity to anticipate critical hydrological conditions, and reinforces the technical foundation required for operational continuity, energy efficiency, and system resilience.

Citar este artículo:

Fuentes J. y Salic H. (2025). La variabilidad de la lluvia como punto de partida para la seguridad hidrológica de presas. *Revista Guatemalteca de Ciencias de la Tierra*, 12 (01), 27-36.

1. Introducción

La parte alta de la cuenca del río Chixoy, de acuerdo con el Atlas Hidrológico (INSIVUMEH, 2005), posee una disponibilidad media de recursos hídricos superficiales, con lluvia anual entre 900 a 1 300 milímetros anuales y un módulo hidrológico de 25 m³/s (inferior al promedio nacional). Esta región aporta el 40 % del caudal al sitio de la presa hidroeléctrica Chixoy, propiedad del Instituto Nacional de Electrificación, de gran valor en el mercado eléctrico y desarrollo de la nación, debido a su aporte en la matriz energética, siendo, además la de mayor capacidad instalada y producción en la actualidad. Asimismo, esta región constituye la cabecera de la vertiente del golfo de México, constituida por 10 cuencas hidrográficas, en donde por su aporte y otros factores geomorfológicos y biofísicos, destaca la cuenca del río Usumacinta, más del 50 % del territorio nacional drena hacia esta vertiente.

Dada la importancia que representa esta región, la zona es estratégica para la agricultura, producción forestal, generación energética y gestión de riesgos naturales. Cuenta con una red de estaciones meteorológicas e hidrométricas operadas por instituciones estatales (INDE e INSIVUMEH), la cual de acuerdo con los estándares y criterios se considera aceptable acorde a las condiciones geomorfológicas y biofísicas, en donde se genera data de calidad y de gran utilidad en simulaciones para estimar el comportamiento espacial y temporal de las principales variables del ciclo hidrológico. La longevidad de las series supera los 30 años, lo que facilita el análisis de tendencia y variabilidad.

Guatemala, por su ubicación geográfica y condiciones climáticas, así como factores endógenos y exógenos, es altamente vulnerable a los efectos producidos tanto por el cambio climático y a la variabilidad climática, lo que impacta sectores claves como: salud, forestal (pérdida de áreas), agrícola (seguridad alimentaria), ambiental (ecosistemas), riesgos naturales (inundaciones y sequías) y generación energética. En este contexto de cambio climático y variabilidad climática, resalta

el concepto de variabilidad hidrológica, cuando en un sistema se detectan cambios significativos en las entradas o salidas del mismo, principalmente las variables lluvia, infiltración, escurrimiento y evapotranspiración, mismas que están relacionadas con factores endógenos en un sistema hídrico, tales como la dinámica en el cambio en el uso de la tierra.

Por consecuencia, la comprensión profunda en la dinámica de la variabilidad climática es relevante para la seguridad hidrológica de presas, donde es vital la operación continua de las redes de estaciones, gestión integral de eventos extremos y aspectos normativos. En consecuencia, se pretende que con el conocimiento profundo de todos los factores que intervienen en la seguridad hidrológica, se maximice la funcionalidad de las presas y sus estructuras, con base en su esquema operativo y que, a la vez, mediante la planificación integrada de los recursos hidráulicos se mitiguen los impactos de la variabilidad climática.

2. Metodología

Para la estimación del impacto de la variabilidad de la lluvia en el régimen hidrológico en la cuenca del río Chixoy, el análisis se centró en la estación hidrométrica Chisiguán (Sacapulas, Quiché), que comprende la parte alta de la cuenca, con un área de 2,245 km². Se utilizaron series temporales con detalle diario correspondientes a los registros de lluvia de diez estaciones meteorológicas con más de 30 años de operación continua, en las cuales se verificó la consistencia, independencia, homogeneidad y estacionalidad, propiedades indispensables que deben cumplirse, tal como lo estipula la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2011). Asimismo, se recopiló y analizó la data histórica correspondiente a la estación hidrométrica Chisiguán, verificando a la vez, sus principales propiedades.

La red de estaciones meteorológicas con base en la variable lluvia, se aplicaron metodologías de Fattorelli y Fernández (2011) y Aparicio (2001), para evaluar su evaluación en cuanto al error y densidad.

La relación caudal y lluvia con detalle temporal anual en ambas variables, se obtuvo mediante el análisis gráfico de la variación adimensional, la cual consiste en dividir el valor anual entre el módulo pluviométrico o hidrológico, respectivamente, como lo señalan Bertoni y Ganancias (2010). Posterior, el análisis de correlación lineal fue realizado de forma gráfica en conjunto con intervalos de confianza al 95 %, como lo plantea Mejía (2017), asimismo, se dedujo el modelo de regresión lineal, mismo que fue validado estadísticamente, tal como lo establece Villon (2006).

La independencia de eventos en el caso de las series temporales anuales de lluvia (media en la cuenca, definida mediante la ponderación de áreas) y caudal, así como de eventos extremos, se determinó al aplicar la prueba de Anderson, mediante el uso del coeficiente de autocorrelación serial (r_k), para diferentes tiempos de retraso k , descrito por Escalante y Reyes (2002), citado por Gómez et al. (2010). La independencia en las series evidencia la falta de dependencia entre eventos sucesivos, asimismo, la carencia de gradientes.

La prueba de Cramer, como lo señala Mejía (2017), se aplicó a las series con detalle temporal anual de lluvia y caudal, para estimar la homogeneidad, fundamental para verificar que estadísticamente todos los datos en la serie pertenecen a la misma población. El análisis de la tendencia fue realizado mediante la aplicación del test no paramétrico SROC (*Spearman Rank Order Correlation*), recomendado por la Organización Meteorológica Mundial (OMM), de acuerdo con Kundzewicz y Robson, citados por Vich, A., Bizzorto, F., et al. (2010), misma que se basa en tres componentes, los cuales son: sentido, longitud y ocurrencia cronológica de los eventos.

La variabilidad en las series hidrológicas puede ser interanual o intraanual (asociada esta última a la estacionalidad), asimismo, considerando que las series con detalle anual suelen ajustarse a la distribución Normal, se realizó el análisis gráfico mediante la comparación de las series con la distribución en mención, en conjunto con los límites

o intervalos de confianza, con relación a lo planteado por Ven Te Chow (1994). Este análisis gráfico se realizó en escala probabilística Normal, de acuerdo a la metodología planteada por Hann (1994).

Para estimar el impacto de la variabilidad de la lluvia sobre el régimen hidrológico en la cuenca del río Chixoy, se analizó la serie temporal de lluvia anual, con el objeto de detectar algún cambio, patrón o tendencia en el comportamiento de la misma, asimismo, en cuanto al régimen hidrológico, se consideró los caudales anuales, mínimos (1 día, 30 días y 60 días consecutivos) y caudales extremos.

El análisis de caudales extremos conllevó la obtención de la serie de excedencia anual o crecida máxima, a la cual se les estimó propiedades como homogeneidad, independencia y tendencia, posterior, el análisis de la variabilidad de la lluvia fue realizado considerando el caudal máximo, volumen de escurrimiento y coeficiente de escurrimiento, como componentes principales de los hidrogramas.

El impacto de la variabilidad de la lluvia sobre el régimen hidrológico de series temporales anuales, se obtuvo al aplicar la ecuación simplificada de la variabilidad hidrológica anual citada por Tucci (2002), mostrada a continuación:

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \frac{C2}{C1} \left(1 + \frac{\Delta P}{P} \right) - 1$$

Esta ecuación relaciona el impacto de la variabilidad de la lluvia en el régimen hidrológico, sintetizada en la variación del coeficiente de escurrimiento, en donde ΔQ (variación del caudal producida a posterior de observado cambio en la lluvia), Q (caudal o volumen de escurrimiento anual), ΔP (variación producida sobre la lluvia), $C1$ (coeficiente de escurrimiento superficial antes de producido el cambio en la lluvia) y $C2$ (coeficiente de escurrimiento superficial después de producido el cambio en la lluvia).

Para la estimación del impacto en el cambio de régimen de la lluvia sobre los eventos de crecida

máximos anuales, se consideró el coeficiente de escurrimiento (C). Algunos autores como Gómez et al. (2019), mencionan que los eventos de crecida se pueden caracterizar a través de diferentes variables hidrológicas, tales como: caudal máximo, altura máxima, volumen de escurrimiento superficial y duración del evento, variables que guardan relación estrecha entre sí, y que a la vez reflejan la respuesta de la cuenca hidrográfica en los procesos de transformación de lluvia a escurrimiento. En cuanto al coeficiente de escurrimiento, es una variable que se relaciona al menos con caudal máximo y volumen de escurrimiento, en donde el contenido de humedad del suelo desempeña un rol relevante en la generación de avenidas.

Dentro del contexto del análisis de caudales de diseño es habitual o tradicional la predominancia de la variable caudal máximo de la avenida, sin embargo, otras variables como el volumen de escurrimiento son igual de trascendentes en la estimación

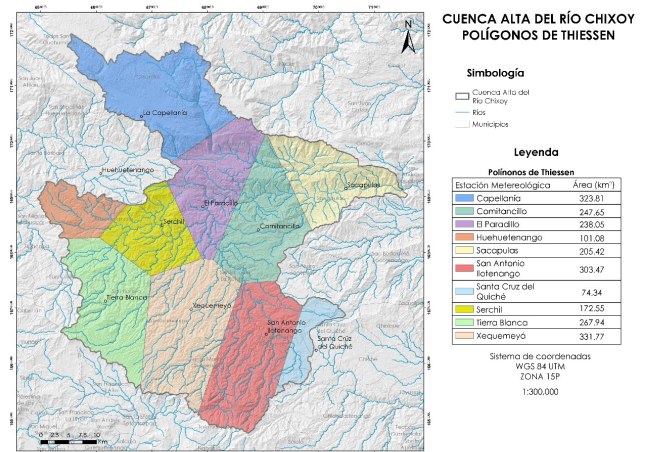
3. Resultados y discusión

Red de monitoreo

De acuerdo con la red de estaciones meteorológicas mostradas en la figura 1 en conjunto con los polígonos de Thiessen, se muestra homogeneidad en la distribución de la mismas, con lo que se obtiene que el error asociado a la misma es menor al 10 %, el cual se considera aceptable dada a la distribución espacial en el comportamiento de la lluvia en la cuenca.

Figura 1

Red de estaciones meteorológicas en la parte alta de la cuenca del río Chixoy



Para consideraciones de relieve y clima similares al área en estudio, al aplicar el criterio de la Organización Meteorológica Mundial, se deduce que la densidad mínima de estaciones pluviométricas oscila entre 100 a 250 km², lo que coincide con la densidad actual que es menor a los 250 km²/estación.

Es evidente entonces que el error de la red puede reducirse al incrementar el número de estaciones, sin embargo, es imprescindible que prevalezca el concepto de red óptima y completa, que mediante su distribución homogénea brinde la data representativa del comportamiento espacial y temporal de las variables de interés, en especial la lluvia, por ser el insumo principal en modelación como entrada en un sistema hidrológico. Es importante hacer mención que además de la distribución de las estaciones, así como la calidad de la data que se genera, es relevante el cumplimiento e implementación continua de los planes de mantenimiento y operación, lo que constituye la hidrología operativa.

Régimen pluviométrico hidrológico

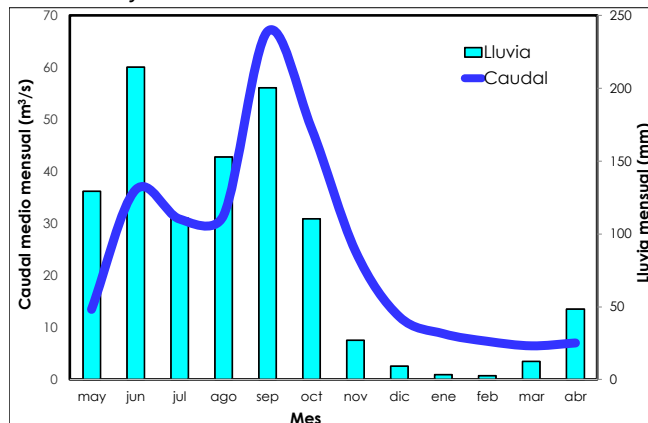
El período que se utilizó corresponde a partir del año hidrológico 1992 al 2025, el cual coincide con registros en todas las estaciones de referencia, en donde se deduce que la lluvia media anual es de

1,020 milímetros, con valores que oscilan entre 1,600 y 730 milímetros, que corresponden a los años hidrológicos 2010 – 2011 y 2016 – 2017, respectivamente. En el año hidrológico 2010 – 2011, suscitó la tormenta tropical Agatha, mientras que en el año hidrológico 2016 – 2017 se registró el mayor déficit por efecto del Fenómeno El Niño.

El módulo pluviométrico en el área de estudio es significativamente menor al promedio a nivel nacional, con distribución bimodal de la lluvia correspondiente a los meses de junio y septiembre con los mayores acumulados, con descenso considerable durante julio y agosto, como se muestra en la figura 2. Cabe hacer énfasis que en los últimos 5 años este comportamiento bimodal es menos evidente, lo cual puede deberse a efectos de la variabilidad climática, aunado a la dinámica en el cambio de uso de la tierra.

Figura 2

Variabilidad intraanual (hidropatrón) en el comportamiento de la lluvia y caudal

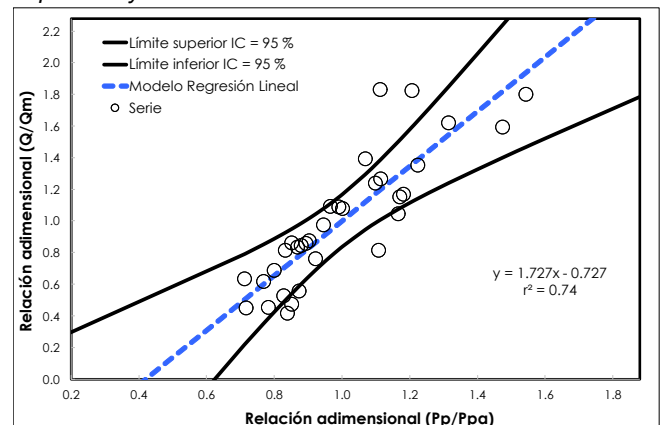


El caudal medio o módulo hidrológico se estima en 24.48 m³/s, lo que corresponde a un caudal específico o de rendimiento de 10,91 L/s/km², oscilando entre 2,88 y 29,80 L/s/km², mismo que de acuerdo al régimen pluviométrico y las condiciones biofísicas y geomorfológicas se considera de bajo a moderado, similar a lo obtenido en el Balance Hidrológico de las Subcuencas de la República de Guatemala, realizado por IARNA (2015). De la curva de permanencia de caudales se deduce que el caudal al 50 % corresponde a 12,3 m³/s, cabe

mencionar que el área geográfica en estudio corresponde al 40 % del total hasta el sitio donde se ubica la presa de planta hidroeléctrica Chixoy, en donde el módulo hidrológico es de 55 m³/s, por lo que es concluyente que existe mayor rendimiento en la parte media y baja de la cuenca, principalmente, el área que limita con las cuencas de los ríos Polochic y Cahabón.

Figura 3

Relación adimensional entre el régimen de escurrimiento superficial y lluvia

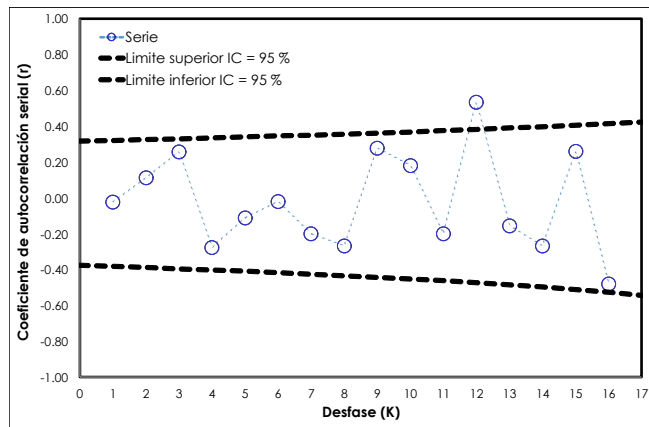


La relación adimensional entre el escurrimiento y la lluvia, ambas con detalle temporal anual, se muestra en la figura 3. Habitualmente, la relación adimensional entre la lluvia y otros componentes del ciclo hidrológico tiende a ser no lineal, como el caso de la infiltración y evapotranspiración, sin embargo, al observar la figura es evidente la relación lineal entre ambas variables, con un coeficiente de determinación (r^2) de 0,74 lo que corresponde a un valor de 0.86 para el coeficiente de correlación lineal de Pearson (r), asimismo, la mayor cantidad de puntos están comprendidos dentro del intervalo de confianza definido.

De la prueba de significancia al 95 % se deduce que el valor de t calculado ($t_c = 9,48$) es mayor al valor de t tabular ($t_t = 2,04$), por lo que se concluye que se rechaza la hipótesis nula (que plantea ausencia de significancia), por lo tanto, existe significancia estadística en la correlación lineal entre ambas variables.

De la figura 4 se deduce que la serie de caudal medio anual cumple con el criterio de independencia, con solo un punto fuera de los intervalos de confianza (menos del 10 %), sin embargo, es evidente la observación de un patrón, lo cual en concordancia con Chong-yu (2006), corresponde a un componente autorregresivo o proceso Markoviano.

Figura 4
Correlograma de la serie de caudales medios anuales con intervalos de confianza al 95 %



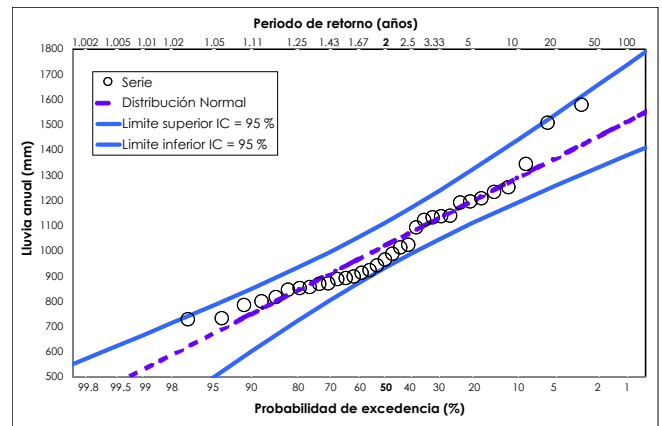
Dentro de la dinámica de una cuenca hidrográfica la lluvia es la variable principal de entrada al sistema, reflejada en cada uno de los componentes del ciclo hidrológico, principalmente en el escurrimiento, no obstante, otros factores (endógenos y exógenos) afectan el régimen hidrológico. De acuerdo con Monsalve (2009), este comportamiento obedece al fenómeno de Persistencia, en donde la tendencia de un valor bajo es más probable que sea precedido por un valor más bajo y viceversa con los valores altos, proceso que puede ser modelado de forma estocástica mediante una cadena markoviana de primer orden, la cual posee dos componentes, determinístico y aleatorio.

Adicionalmente, este comportamiento es el reflejo de la variabilidad interanual en la serie, producto de la alternancia de factores exógenos que inciden en el régimen hidrológico en la cuenca en estudio, en especial, las distintas fases del Fenómeno El Niño.

Variabilidad de la lluvia y su impacto en el escurrimiento superficial

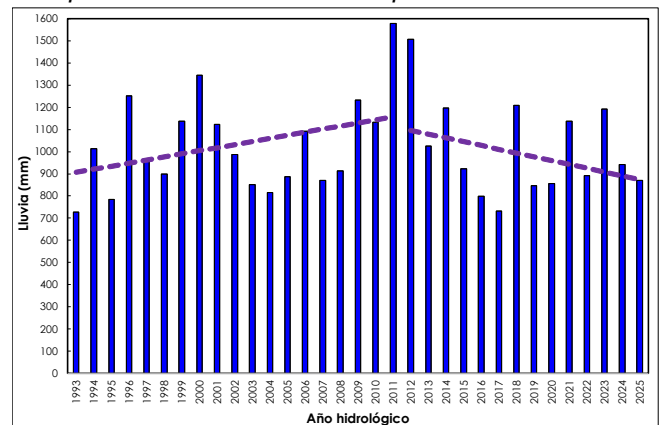
Del análisis de variabilidad de la serie de lluvia anual se deduce que la misma presenta un ajuste satisfactorio a la distribución Normal (ausencia de anomalías) con la totalidad de los puntos comprendidos dentro de los intervalos de confianza, aunque, destacan los casos de los años extremos que se encuentran en el límite superior, mostrada a continuación:

Figura 5
Variabilidad de la serie de lluvia anual



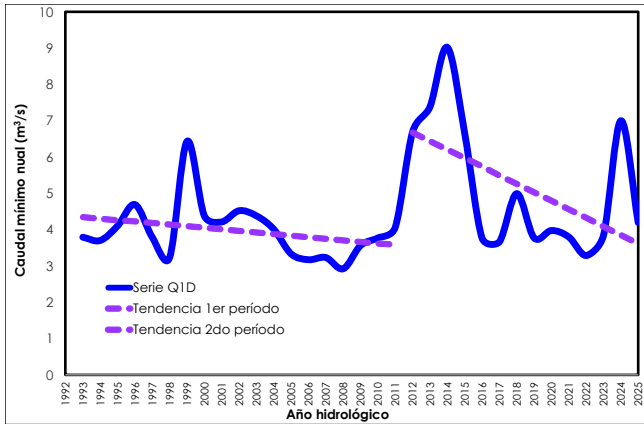
Resalta en la serie de lluvia anual (mostrada en la figura 6), un cambio de tendencia en el año hidrológico 2010-2011, en donde suscitó el evento de lluvia de mayor magnitud durante el período de registro en la red de estaciones meteorológicas (mayor a 40 años). En la siguiente figura se muestra la serie de lluvia anual.

Figura 6
Comportamiento de la serie temporal de lluvia anual



El cambio en la serie de lluvia se ve reflejado en el comportamiento del caudal mínimo anual, con definición de ambos períodos, pendiente suave negativa en el primer período, mientras que en el segundo la pendiente incrementa significativamente, como se muestra en la siguiente figura.

Figura 7
Tendencia en la serie de caudal mínimo anual



Es imprescindible hacer mención del Fenómeno de Persistencia, en donde el comportamiento de la lluvia con detalle estacional se refleja en los caudales de estiaje durante el presente año hidrológico. La prueba de tendencia de Spearman (al 95 %) refleja significancia en el segundo período y ausencia de la misma, en el primero y en la serie completa, como se muestra en el cuadro siguiente.

Tabla 1
Significancia en la tendencia de la serie de caudal mínimo anual

Serie	Coefficiente Rs Spearman	T teórico	T calculado	Significancia
Completa	0.09	2.04	0.51	Ausente
Primer período	0.36	1.21	1.35	Ausente
Segundo período	0.38	1.33	1.67	Presente

Los resultados al aplicar la ecuación simplificada de la variabilidad hidrológica anual, se muestra a continuación:

Tabla 2
Impacto de la variabilidad de la lluvia anual sobre el escurrimiento superficial

Serie	Coeficiente de escurrimiento (C)		Módulo hidrológico		Impacto
	C ₁	C ₂	MH ₁	MH ₂	
Caudal medio	0.37	0.30	26.6	24.5	0.20
Caudal mínimo Q ₁ D	0.06	0.07	4.0	5.2	0.27
Caudal mínimo Q ₃₀ D	0.07	0.09	5.1	6.4	0.21
Caudal mínimo Q ₆₀ D	0.08	0.10	5.7	7.1	0.21
Caudal máximo	0.15	0.10	478.3	303.2	0.68

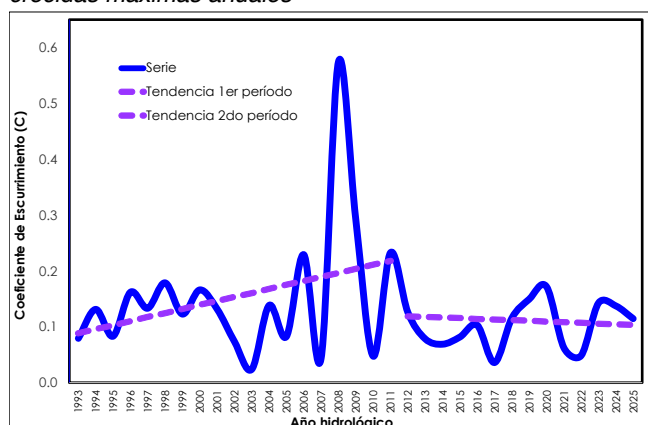
El impacto en la variabilidad anual de la lluvia de 0.2 para la serie de caudal medio anual, y entre 0.21 a 0.27 para las series de caudales mínimos (Q₁D, Q₃₀D y Q₆₀D), con mayor afectación en el caudal mínimo en un día, siendo igual el impacto para las series de caudales mínimos en 30 y 60 días consecutivos.

Aunado a la variabilidad de la lluvia como factor exógeno, resalta la dinámica de la cuenca hidrográfica en cuanto a los procesos de transformación de lluvia a escurrimiento, en donde el cambio de uso de la tierra es una variable preponderante.

Asimismo, cabe destacar el almacenamiento en la cuenca el que es función de las características fisiográficas, geomorfológicas, edafológicas, de uso de la tierra y del régimen pluviométrico en el área de influencia hidrológica. En cuanto a la generación de avenidas, es más evidente el impacto de la variabilidad de la lluvia sobre estos eventos, como puede verse en la siguiente figura la dinámica en cuanto al comportamiento del coeficiente de escurrimiento.

Figura 8

Tendencia del coeficiente de escurrimiento en la serie de crecidas máximas anuales



Resalta la tendencia con sentido positivo durante el primer período, la cual es significativa al aplicar la prueba de Spearman, mientras que en el segundo período no existe significancia en la tendencia con sentido leve negativo. De acuerdo con Martínez & Fernández, citado por Cantera et al. (2009), los caudales extremos poseen dos componentes, avenidas frecuentes o caudales a banca llena y los caudales máximos extremos, en ambos, sus parámetros hidrológicos corresponden a magnitud, frecuencia, duración, periodicidad y tasa de cambio. Se observa que el mayor valor del coeficiente de escurrimiento no corresponde al evento máximo, el cual fue suscitado en mayo del año 2010, lo cual se pudo haber debido a que en ese momento el suelo no alcanzaba su máximo contenido de humedad que le permitiera tener una mayor eficiencia en los procesos de transformación de lluvia a escurrimiento.

Al aplicar la prueba de Spearman, se deduce que la tendencia posee significancia únicamente en el primer período en donde el sentido es positivo, el segundo período posee leve sentido negativo. En la serie de caudal máximo el impacto es significativo, el cual es mayor a 0.6, de acuerdo con otros estudios en el ámbito nacional, este valor se encuentra dentro del intervalo esperado.

Es imprescindible entonces la comprensión profunda del impacto de la variabilidad de la lluvia en el régimen del escurrimiento superficial, como punto de

partida para alcanzar la seguridad hidrológica de las presas, reflejado en la operación de cada componente de las plantas de generación de energía eléctrica, así como, el conocimiento en la dinámica de los procesos internos y externos que influyen en la transformación de lluvia a escurrimiento superficial. En consecuencia, es relevante el papel de la seguridad hidrológica para garantizar la seguridad energética a nivel nacional.

4. Conclusiones

El error asociado a la red de monitoreo meteorológico se encuentra en un rango aceptable (menor al 10 %), considerando las condiciones geomorfológicas, fisiográficas y biofísicas en el área de la parte alta de la cuenca del río Chixoy.

El menor impacto de la variabilidad de la lluvia se estimó en la serie de caudal medio anual, mientras que en la serie de caudal mínimo es mayor en un día, siendo idénticas para las series de caudales mínimos en 30 y 60 días consecutivos, lo que evidencia estabilidad en la permanencia del caudal durante la temporada de estiaje.

El impacto de la variabilidad de la lluvia es mayor en la serie de caudales máximos, reflejado en el coeficiente de escurrimiento, derivado a los factores endógenos y exógenos que intervienen en el proceso de generación de avenidas.

Comprender la variabilidad de la lluvia y su efecto en el régimen hidrológico es esencial para garantizar la seguridad de las presas y su operación a largo plazo. Este conocimiento permite gestionar el recurso hidráulico de manera más eficiente, prever situaciones críticas y fortalecer la capacidad de respuesta de los sistemas frente a la variabilidad climática, asegurando, además, un suministro eléctrico estable y confiable.

5. Recomendaciones

Integrar el componente de la variabilidad de la lluvia en estudios relacionados a la seguridad hidrológica de presas, en proyectos de aprovechamiento de los recursos hidráulicos en generación eléctrica.

Profundizar en el conocimiento de la dinámica en la generación de avenidas, con el objeto de estimar eventos de diseño donde se considere otra variable, como volumen de escurrimiento o tiempo de duración del hidrograma.

Mitigar los impactos de la variabilidad climática mediante la adopción de prácticas de restauración hidrológica o ambiental, dentro del concepto de manejo integral de cuencas.

6. Agradecimientos

Al Ingeniero Abner Antulio Vásquez, por su apoyo y acompañamiento en el análisis geomorfológico y geoespacial del área de interés, así como al personal técnico y administrativo del Departamento de Hidrología del INDE y del Departamento de Investigación y Servicios Hídricos del INSIVUMEH, por su dedicación y compromiso en administrar y operar las redes de estaciones meteorológicas e hidrométricas, de acuerdo con los estándares establecidos.

7. Referencias

- Aparicio, F. (2001). *Fundamentos de hidrología de superficie*. Editorial Limusa, S.A. de CV, Grupo Noriega Editores, México.
- Bertoni, J. y Ganancia, F. (2010). *Comportamiento hidrológico y criterios del diseño de obras hídricas en sistemas climáticos cambiantes: reflexiones y análisis de casos*. Universidad Nacional del Litoral, Argentina.
- Cantera Kintz, J., Carvajal, y Castro, L. (2009). *Caudal ambiental, conceptos, experiencias y desafíos*. Programa Editorial Universidad del Valle. Colombia.
- Chong-yu, X. (2006). *Hydrologic models*. Department of Geosciences, University of Oslo.
- Chow, V y Maidment, D. (1994). *Hidrología aplicada. Colombia*: McGraw-Hill.
- Fattorelli, S y Fernández, P. (2011). *Diseño hidrológico*. Water Assessment & Advisory Global Network.

Gómez, J., Aparicio, J., y Patiño, C. (2010). *Manual de análisis de frecuencias en hidrología*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Morelos, México.

Gómez, M., Pilar, J., Ruberto, A., Depettris, C., y Méndez, G. (2019). *Verificación de la estabilidad estadística de la serie de caudales del río Paraná en la sección Corrientes*. Programa Hidrológico Internacional de la Oficina Regional de Ciencia para América Latina y el Caribe de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). Montevideo.

Hann, C. (1994). *Statistical methods in hydrology*. Iowa, Press.

Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente (2015). *Balance hidrológico de las subcuencas de la república de Guatemala*. Universidad Rafael Landívar.

Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (2005). *Atlas hidrológico*. Guatemala.

Malinow, G. (2010). *Criterios para la seguridad hidrológica de presas*. Universidad Nacional del Litoral, Argentina.

Mejía, J. (2012). *Hidrología aplicada*. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima.

Monsalve, G. (1995). *Hidrología en la ingeniería*. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, Bogotá. 2da. Edición.

Organización Meteorológica Mundial (2011). *Guía de prácticas hidrológicas, gestión de recursos hídricos y aplicación de prácticas hidrológicas*. Vol II, OMM No. 168.

Vich, A., Bizzotto, F., Vaccarino, E., Correas, M., y Manduca, F. (2010). *Tendencias y cambios abruptos en el escurrimiento de algunos ríos con nacientes en la cordillera y serranías del oeste argentino*. Universidad Nacional del Litoral, Argentina.

Villón, M. (2006). *Hidrología estadística*. Editorial Tecnológica de Costa Rica. Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Acceso Abierto

Este artículo está protegido por una licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional, que permite su uso, intercambio, adaptación, distribución y reproducción en cualquier medio o formato, siempre y cuando se cite adecuadamente al autor o autores originales y la fuente, se proporcione un enlace a la licencia Creative Commons y se indique si se han realizado cambios. Las imágenes u otro material de terceros que aparece en este artículo están incluidos

en la licencia Creative Commons del artículo, a menos que se indique lo contrario en la línea de crédito del material. Si el material no está incluido en la licencia Creative Commons del artículo y el uso que se pretende darle no está permitido por la normativa legal o excede el uso permitido, será necesario obtener el permiso directamente del titular de los derechos de autor.

Para ver una copia de esta licencia, visite <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

