

Análisis del Proceso Hidrológico de Microcuencas Forestales Pareadas y Evaluación del Efecto del Establecimiento de Presas en Cauces y Cárcavas Analysis Of the Hydrological Process of Paired Forest Small Catchments and Evaluation of the Effect of Dam Construction in Channels and Gullies

Pedro Rivera-Ruiz^{1,3} , Demetrio Salvador Fernández-Reynoso^{1*} ,
Juan Enrique Rubiños-Panta¹ , Cándido Mendoza-Pérez¹ ,
Jorge Víctor Prado-Hernández² y Abdul Khalil-Gardezi¹

¹ Colegio de Postgraduados. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo. 56264 Texcoco, Estado de México, México; (P.R.R.), (D.S.F.R.), (J.E.R.P.), (C.M.P.), (A.K.G.).

² Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco km 38.5, Col. Chapingo. 56230 Texcoco, Estado de México, México; (J.V.P.H.).

³ Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac No. 8532, Col. Progreso. 62550 Jiutepec, Morelos, México; (P.R.R.).

* Autor para correspondencia: demetrio@colpos.mx

RESUMEN

Las microcuencas forestales pareadas instrumentadas permiten obtener variables de lluvia y escurrimiento para evaluar la respuesta hidrológica y determinar el efecto de presas en cauces y cárcavas. Se evaluó la respuesta hidrológica de dos microcuencas forestales pareadas de la cuenca del Lago de Pátzcuaro: la microcuenca Ichupio en la que se establecieron presas en cauces y cárcavas y la microcuenca Malacate que se usó como "testigo". Las microcuencas se instrumentaron con pluviómetros digitales para registrar la lluvia y con vertedores de garganta larga con sensores ultrasónicos para registrar el gasto. Mediante una regresión lineal y múltiple, se analizaron 11 variables de precipitación y escurrimiento para identificar su influencia en la respuesta hidrológica de las microcuencas. Se analizaron 13 eventos en pares que presentaron escurrimiento superficial simultáneamente en las microcuencas. El análisis del proceso hidrológico muestra, que la microcuenca Malacate presenta mayores magnitudes de escurrimiento (volumen, lámina, coeficiente, máximo y medio) aun cuando ambas microcuencas presentaron similares cantidades e intensidades de lluvia. Los factores determinantes para que se presente el escurrimiento, en ambas microcuencas, fueron la precipitación total del evento (PTE), la precipitación previa de 2 días (PP2D), la intensidad de la precipitación en 30 minutos (IP30) y el tiempo de escurrimiento (TESC). Cada microcuenca mostró respuestas distintas en las variables de escurrimiento por efecto de las presas en cauces y cárcavas. Existen vínculos entre las obras de conservación del agua y del suelo y las respuestas hidrológicas en la microcuenca Ichupio en términos de escurrimiento directo y descarga máxima. Se observaron diferencias significativas en los gastos e hidrogramas, aun cuando las condiciones de las precipitaciones fueron similares en ambas microcuencas. Los resultados mostraron que la magnitud del escurrimiento depende de la interacción entre las precipitaciones, la cubierta forestal y el establecimiento de presas en cauces y cárcavas.

Palabras clave: escurrimiento, hidrograma, precipitación, regresión múltiple.

SUMMARY

Instrumented paired forest small catchments provide rainfall and runoff data to assess hydrological response and determine the effect of dams in streams and gullies. The hydrological response of two paired forest small catchments in the Lake Pátzcuaro watershed was evaluated: the Ichupio small catchment, where dams were constructed in streams and gullies, and the Malacate small catchment, which served



Cita recomendada:

Rivera-Ruiz, P., Fernández-Reynoso, D. S., Rubiños-Panta, J. E., Mendoza-Pérez, C., Prado-Hernández, J. V., & Khalil-Gardezi, A. (2026). Análisis del Proceso Hidrológico de Microcuencas Forestales Pareadas y Evaluación del Efecto del Establecimiento de Presas en Cauces y Cárcavas. *Terra Latinoamericana*, 44, 1-14. e2277. <https://doi.org/10.28940/terralatinoamericana.v44i.2277>

Recibido: 10 de abril de 2025.
Aceptado: 8 de diciembre de 2025.
Artículo. Volumen 44.
Marzo de 2026.

Editor de Sección:
Dr. Luis Alonso Valdez Aguilar

Editor Técnico:
Dra. Elizabeth Hernández Acosta



Copyright: © 2026 by the authors.
Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC ND) License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

as a control. The small catchments were equipped with digital rain gauges to record rainfall and long-throat weirs with ultrasonic sensors to measure discharge. Using linear and multiple regression analyses, 11 precipitation and runoff variables were evaluated to identify their influence on the hydrological response of the small catchments. Thirteen paired events exhibiting simultaneous surface runoff in both small catchments were analyzed. Analysis of the hydrological processes showed that the Malacate small catchment exhibited higher runoff magnitudes (volume, depth, coefficient, maximum, and mean), even though both small catchments received similar rainfall amounts and intensities. The determining factors for runoff in both small catchments were total event precipitation (PTE), precipitation during the previous 2 days (PP2D), precipitation intensity over 30 minutes (IP30), and runoff duration (TESC). Each small catchment exhibited distinct responses in runoff variables due to the presence of dams in streams and gullies. Associations were identified between water and soil conservation structures and hydrological responses in the Ichupio small catchment, particularly in terms of direct runoff and peak discharge. Significant differences were observed in discharge rates and hydrographs, despite similar rainfall conditions in both small catchments. The results indicate that runoff magnitude depends on the interaction among rainfall, forest cover, and the construction of dams in streams and gullies.

Index words: runoff, hydrograph, rainfall, multiple regression.

INTRODUCCIÓN

La cobertura y el uso del suelo influyen de manera determinante en los procesos hidrológicos de una cuenca hidrográfica, pues condicionan el balance entre infiltración, almacenamiento, evapotranspiración y escurrimiento superficial. Cambios en la estructura y composición de la vegetación, así como en las prácticas de manejo asociadas a diferentes usos del suelo, pueden modificar la magnitud y distribución espacial del flujo hídrico, así como la susceptibilidad a la erosión y el transporte de sedimentos (Shi *et al.*, 2018; Richardson *et al.*, 2023).

Los ecosistemas forestales se reconocen por su capacidad de conservar el agua y el suelo, ya que reducen la escorrentía superficial y favorecen la infiltración, lo que los convierte en componentes clave para la sostenibilidad de las cuencas. La respuesta hidrológica de las cuencas forestales presenta una notable complejidad, derivada de la interacción simultánea de la estructura geológica, la pendiente, la densidad y el tipo de vegetación, así como del historial de intervención y manejo (Zhang *et al.*, 2017; Çtgez, Karagül y Özcan, 2021; Zhang y Wei, 2014). Por lo cual, el establecimiento de relaciones consistentes entre la cobertura vegetal y la respuesta hidrológica resulta complejo, particularmente cuando se incorporan obras o prácticas de conservación de suelo y agua.

Diversos estudios en cuencas experimentales demuestran que el grado de cobertura forestal influye significativamente en la variación del coeficiente de escurrimiento, dependiendo de las condiciones locales y del manejo del ecosistema (Martínez-Fernández, Ceballos, Hernández, Casado y Morán, 2005; Atalar *et al.*, 2021; Richardson *et al.*, 2023), Chow *et al.* (2011) mostraron que el volumen de salida medio anual en cuencas forestales era superior que en cuencas agrícolas, debido a las prácticas de conservación del suelo y el agua aplicadas en zonas agrícolas. Sriwongsitanon y Taesombat (2011) observaron que las cuencas con mayor porcentaje de bosque, el coeficiente de escurrimiento se asociaba con una mayor torrencialidad, por un mayor contenido de humedad antecedente, y un decrecimiento de los caudales por un menor contenido de humedad antecedente resultado de las precipitaciones previas. Por su parte, Lacombe *et al.* (2016) señalaron que la respuesta hidrológica ante cambios en la cubierta forestal puede variar considerablemente entre cuencas, particularmente en escenarios de reforestación o implementación de obras de conservación. Estas observaciones evidencian el papel hidrológico de los bosques y que no pueden caracterizarse mediante relaciones simples, sino que requiere de análisis contextualizados y comparativos.

Aunque la investigación hidrológica ha avanzado significativamente, la influencia de la cobertura vegetal y uso del suelo continúan siendo un tema central en el análisis del comportamiento de las cuencas. Diversos estudios señalan la necesidad de realizar investigaciones que profundicen en la relación entre la cobertura forestal y el escurrimiento, debido a la limitada disponibilidad de datos de alta calidad sobre precipitaciones y caudal. Además, se requieren metodologías que permitan aislar el efecto hidrológico de factores no forestales, como la variabilidad del clima y las actividades humanas (por ejemplo, las agrícolas (Richardson *et al.*, 2023), las obras y prácticas de conservación de agua y de suelo (Van Loon *et al.*, 2019), y la urbanización (Vose *et al.*, 2011).

Una metodología ampliamente utilizada para evaluar los efectos de cambios en la cobertura y uso del suelo, sobre la respuesta hidrológica, es el análisis de cuencas pareadas. El primer estudio que aplicó este enfoque fue en el área de Wagon Wheel Gap, para dos cuencas de las Montañas Rocosas de Colorado, donde se investigó la influencia de la cobertura del suelo en el caudal de los arroyos (Hibbert, 1967). Esto condujo a estudios similares reportados por Bosch & Hewlett (1982), Andréassian (2004) y Richardson *et al.*, (2023) quienes analizaron mediante cuencas pareadas, la influencia de la cubierta forestal en el flujo del agua, así como, también Chang, Liu, Cao, Wang y Shen (2024) y Van Loon *et al.* (2019), evaluaron el impacto de alteraciones de la cubierta vegetal en el escurrimiento y los picos de inundación.

El análisis de cuencas pareadas consiste en seleccionar dos cuencas cercanas con características biofísicas semejantes (por ejemplo, tamaño, morfología, geología, clima y uso del suelo), para comparar y cuantificar los cambios en los flujos hidrológicos (Andréassian, 2004). Una de las cuencas se mantiene sin intervención (cuenca control) y la otra es objeto de tratamientos o prácticas de manejo (cuenca tratamiento), de modo que las diferencias observadas en la respuesta hidrológica pueden atribuirse a las intervenciones aplicadas. Se asume la existencia de una relación consistente, cuantificable y predecible entre las variables de respuesta de las cuencas de control y las cuencas de tratamiento (Clausen y Spooner, 1993). Para garantizar condiciones comparables, las cuencas pareadas suelen ser adyacentes, lo que permite minimizar la variabilidad asociada a los aportes climáticos y las propiedades biofísicas de la cuenca (Van Loon *et al.*, 2019). Asimismo, la coincidencia cronológica de las observaciones de las cuencas pareadas se considera necesaria para garantizar que los registros del escurrimiento se generen a partir de entradas hidrológicas prácticamente idénticas (Brown, Zhang, McMahon, Western y Vertessy, 2019). Generalmente, un período de registro de escurrimientos entre 3 a 10 años permite evaluar la similitud o diferencia entre las respuestas hidrológicas frente a eventos climáticos o ambientales (Andréassian, Lerat, Le Moine y Perrin, 2012).

Cabe destacar que el comportamiento hidrológico de las microcuencas tiende a ser diferente al de grandes cuencas; una microcuenca es más sensible a las precipitaciones de alta intensidad y corta duración, a las características de la cubierta del suelo y las condiciones de topografía y morfología de la red hídrica (Suryatmojo, Fujimoto, Kosugi y Mizuyama, 2014). Además, en las cuencas pareada se busca la coincidencia cronológica de las observaciones para garantizar que el escurrimiento se genera a partir de entradas casi idénticas (Brown *et al.*, 2005; Van Loon *et al.*, 2019). Con datos de un período de registro de escurrimientos de 3 a 10 años se puede evaluar la similitud o diferencia entre las respuestas hidrológicas, de las cuencas pareadas, a las lluvias que se presentan. Incluso se puede perturbar o hacer cambios en la cuenca de tratamiento y se comparan las respuestas subsiguientes con la cuenca no perturbada (control) o de referencia (Andréassian *et al.*, 2012). De este modo, las variaciones en los resultados entre ambas cuencas pueden ser atribuidos a cambios en el estado del sistema (por ejemplo, la humedad del suelo y el flujo subterráneo) lo cual debe considerarse al interpretar los efectos de las intervenciones (Kang y Sharma, 2024).

En este marco, durante el período de 2008 a 2014, se implementaron obras y prácticas de conservación de agua, suelo y bosque en la microcuenca forestal Ichupio, perteneciente a la cuenca del Lago de Pátzcuaro. El objetivo de la presente investigación es evaluar los efectos de dichas intervenciones en la respuesta hidrológica. Para ello se instrumentaron y aforaron dos microcuencas pareadas: Ichupio (tratamiento) y Malacate (control). En ambas se registraron de manera sistemática y continua los escurrimientos para caracterizar su comportamiento hidrológico, analizar su respuesta ante eventos pluviométricos de diferente intensidad e identificar los factores que expliquen las variaciones observadas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación de las Microcuencas Pareadas

La zona de estudio se conforma por dos microcuencas pareadas, una es Ichupio (101.85 ha) en la que se construyeron 22 presas de gaviones, 19 presas de piedra acomodada y 23 presas de geocostales en cauces y cárcavas de zonas erosionadas; y la microcuenca Malacate (149.24 ha), utilizada como testigo donde no constan obras de conservación. Ambas microcuencas cuentan con una cobertura forestal predominantemente de pino-encino (79.4 y 74.1% de la superficie), con áreas de matorrales y arbustos (10.5 y 16.6%) y agricultura (1.7 y 1.2%), para Ichupio (tratamiento) y Malacate (control), respectivamente. La Figura 1, presenta la ubicación de las microcuencas pareadas en la cuenca del Lago de Pátzcuaro (municipio de Tzintzuntzan, Michoacán, México), con tres colores diferentes se muestran el orden de cauces y los tipos de presas construidos en la microcuenca Ichupio. El Cuadro 1 presenta los parámetros geométricos y morfométricos de ambas microcuencas.

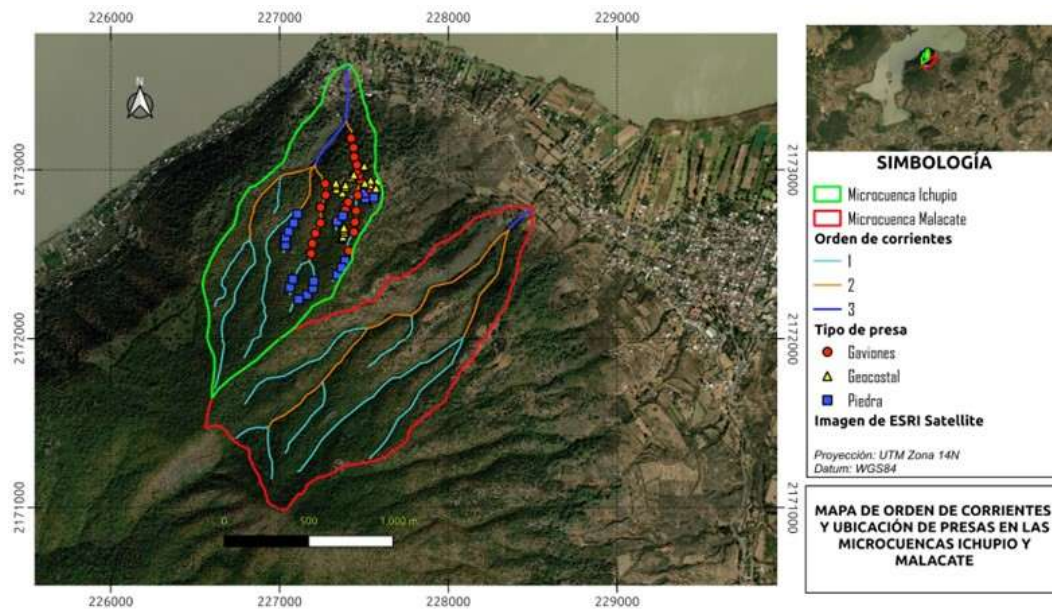


Figura 1. Ubicación, orden de cauces y tipos de presas de las microcuencas forestales Ichupio y Malacate.
Figure 1. Location, streams order and types of dams in the Ichupio and Malacate forest small catchments.

Cuadro 1. Parámetros morfométricos de las microcuencas forestales Ichupio y Malacate.
Table 1. Morphometric parameters of the Ichupio and Malacate forest small catchments.

Parámetro	Microcuenca Ichupio	Clasificación	Microcuenca Malacate	Clasificación
Área (ha)	101.85	-	149.24	-
Perímetro (km)	4.77	-	5.76	-
Longitud (km)	2.13	-	2.34	-
Ancho (km)	0.48	-	0.64	-
Elevación máxima (m de altitud)	2526	-	2648	-
Elevación mínima (m de altitud)	2060	-	2091	-
Desnivel (m)	466	-	557	-
Coefficiente de compacidad de Gravelius (Kc)	1.32	Forma oval - oblonga	1.32	Forma oval - oblonga
Factor índice de forma de Horton (Kf)	0.22	Alargada	0.27	Alargada
Relación de elongación (Re)	0.53	Alargada con áreas de pendientes pronunciadas	0.59	Alargada con áreas de pendientes pronunciadas
Índice de alargamiento (Ia)	4.45	Alargada	3.67	Alargada
Pendiente media (%)	31.51	Pendientes escarpadas	33.24	Pendientes escarpadas
Longitud del cauce principal (km)	2.27	-	2.43	-
Pendiente del cauce principal (%)	20.23	-	19.95	-
Longitud de corrientes (km)	7.24	-	7.37	-
Densidad de drenaje (Dd) (km cauce km ⁻²)	7.11	-	4.94	-
Coefficiente de torrencialidad (Ct) (cauces km ⁻²)	9.82	-	4.70	-
Relación de bifurcación (Rb)	2.33	-	3.20	-
Orden	3	-	3	-
Densidad de cauces (cauces km ⁻²)	17.67	-	8.72	-
Tiempo de concentración (h)	0.32	-	0.33	-

Las características morfométricas de ambas microcuencas son similares (Cuadro 1), las pendientes del cauce principal son de 20.23 y 19.95%, y las pendientes medias de ambas microcuencas es de 31.51 y 33.24%; es decir, presentan cauces torrenciales y relieve escarpado y condiciones que favorecen el escurrimiento a través de la red de drenaje. La distribución de la red de drenaje indica que ambas microcuencas son del orden de corrientes tres y, por la densidad de drenaje de ambas microcuencas, que tienen una rápida respuesta hidrológica. Se tienen suelos tipo luvisol con características semi impermeables y textura media. Además, el tiempo de concentración es en promedio de 0.32 horas (19.20 min y 19.80 min para la microcuenca Ichupio y Malacate, respectivamente), ambos valores son similares e indican una rápida respuesta del escurrimiento ante eventos de precipitación.

Instrumentación y Registro de Lluvia y Esgurrimiento

Para el registro de datos, en ambas microcuencas, se instalaron pluviómetros digitales HOBO para la medir la precipitación pluvial (con resolución de 0.2 mm) y se construyó un aforador de garganta larga (Figura 2a), con tecnología patentada por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, para registrar con un sensor ultrasónico los escurrimientos cada 3 minutos (Figura 2b).

Análisis de Datos

Para comparar la respuesta hidrológica de cada microcuenca, se evaluaron registros de precipitación y escurrimiento correspondientes a los años 2015, 2016 y 2022. Para analizar eventos, en pares, se seleccionaron 13 eventos simultáneos en ambas microcuencas.

Se comparó la influencia de las presas de control de escurrimiento entre la microcuenca Ichupio (tratamiento) y la microcuenca Malacate (control), esta última caracterizada por la ausencia de obras de conservación. De acuerdo con Serrano *et al.* (2005), la comparación de hidrogramas entre ambas microcuencas pareadas permite identificar diferencias en la respuesta del escurrimiento; sin embargo, estos por sí solos no aportan información suficiente sobre el volumen generado ni sobre los procesos que intervienen en su formación. Con base en esta consideración, se seleccionaron 13 eventos de precipitación y escurrimiento registrados simultáneamente en ambas microcuencas. A partir de dichos eventos se definieron las siguientes once variables:

- Precipitación total del evento (PTE) (mm).
- Precipitación previa de 2 días (PP2D) (mm).
- Tiempo de precipitación (TPRE) (min).
- Intensidad de la precipitación en 30 minutos (IP30) (mm h^{-1}).
- Lámina de escurrimiento (LESC) (mm).
- Tiempo de escurrimiento (TESC) (min).
- Esgurrimiento máximo (EMAX) (l s^{-1}).
- Esgurrimiento medio (EMED) (l s^{-1}).
- Tiempo de respuesta (inicio de la precipitación a comienzo del escurrimiento) (TRESP) (min).
- Tiempo de descarga (fin de precipitación a cese del escurrimiento) (TDES) (min).
- Tiempo a escurrimiento máximo (inicio de la precipitación hasta alcanzar el escurrimiento máximo (TEMAX) (min).



a)



b)

Figura 2. Aforador de garganta larga (a) y equipo con sensor ultrasónico (b) para medición de los escurrimientos.
Figure 2. Long throat channel (a) and equipment with ultrasonic sensor (b) for runoff measurement.

Se integró una base de datos con la información de las variables registradas en ambas microcuencas, a partir de la cual se elaboró una matriz de correlación para explorar las relaciones entre ellas. Este análisis se apoyó con la representación gráfica y el cálculo del coeficiente de determinación (R^2), para cuantificar la fuerza y dirección de las relaciones. Para facilitar la interpretación de los procesos que dominan la respuesta hidrológica, se utilizó el análisis multivariante (clúster) para agrupar eventos que tuvieran características similares y comparables. Esta técnica permitió identificar patrones y relaciones entre variables hidrológicas mediante la formación y clasificación de los datos en grupos homogéneos.

Con el propósito de ponderar adecuadamente el efecto de las distintas variables evaluadas, entre ambas unidades de estudio, se realizó un análisis de regresión múltiple para determinar cuáles variables explican con mayor precisión el comportamiento del escurrimiento superficial de las microcuencas Ichupio y Malacate. Este análisis permitió identificar las variables con mayor peso estadístico en la generación de escurrimiento y en la variabilidad de la respuesta hidrológica.

Para evidenciar la influencia de las obras de conservación y de las condiciones antecedentes de humedad del suelo, en la dinámica hidrológica, se realizó un análisis de hidrogramas tipo para examinar el comportamiento temporal del escurrimiento superficial. El análisis comparativo de los hidrogramas entre eventos y entre ambas microcuencas permitió identificar diferencias en los tiempos de inicio, de ocurrencia del gasto máximo y de duración del escurrimiento; con y sin obras de conservación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis del Proceso Hidrológico en las Microcuencas Pareadas

En el Cuadro 2, se muestra la información obtenida de los 13 eventos de escurrimientos que se presentaron de manera simultánea en ambas microcuencas. Un análisis general de la información muestra que en Malacate se presentaron los mayores escurrimientos tanto en lámina total (mm) como en los escurrimientos máximos y medios registrados. Los parámetros hidrológicos incluidos muestran diferencias claras en la respuesta al escurrimiento entre ambas microcuencas, a pesar de presentar eventos de precipitación similares. En general, Malacate registró mayores valores de lámina de escurrimiento (LESC), escurrimiento máximo (EMAX) y medio (EMED), lo que indica una respuesta más rápida y concentrada del flujo. En contraste, Ichupio presentó menores volúmenes y picos de escurrimiento, evidenciando un comportamiento más amortiguado.

Los tiempos característicos del hidrograma refuerzan esta diferencia, Ichupio tiende a mostrar mayores tiempos de respuesta (TRESP) y menores tiempos de descarga (TDES), lo que sugiere una menor conectividad hidrológica y una mayor retención temporal del agua. Por su parte, Malacate presenta tiempos más cortos, asociados a una respuesta más directa ante los eventos de lluvia. La variabilidad observada entre eventos, incluso bajo condiciones similares de precipitación (PTE, IP30 y PP2D), indica que el escurrimiento no depende únicamente de la lluvia, sino también de factores como la humedad antecedente, la capacidad de infiltración y las características del sistema de drenaje. En este sentido, las diferencias entre microcuencas se atribuyen principalmente a la presencia de obras de conservación en Ichupio, las cuales favorecen la infiltración, reducen la velocidad del flujo y atenúan los picos de escurrimiento, generando una respuesta hidrológica más regulada, como ha sido documentado en cuencas con estructuras de retención similares (Suryatmojo, Masamitsu, Kosugi y Mizuyama, 2013).

En la microcuenca Ichupio se registraron los valores más bajos de las variables de escurrimiento, lo cual se atribuye a la instalación de presas que modificaron el movimiento del agua en cauces y cárcavas. Este comportamiento es consistente con lo reportado por otros autores (Pérez, 2017¹; Suryatmojo et al., 2013; Kang y Sharma, 2024). La lámina de escurrimiento (LESC) fue de 19.30 mm en Malacate, y 5.90 mm en Ichupio; lo que evidencia que las presas contribuyeron a reducir el escurrimiento instantáneo y regular el flujo de agua, alcanzando una disminución del 69.43%. En ambas microcuencas se observó que una mayor intensidad de precipitación en 30 minutos produjo un tiempo al escurrimiento pico más corto.

El análisis de la lámina de escurrimiento directo (LESC) derivado de la precipitación (PTE), muestra que en la microcuenca Ichupio presenta una menor respuesta respecto con la microcuenca Malacate (Figura 3). De manera similar (Figura 4), la relación gráfica entre el escurrimiento máximo (EMAX) y la precipitación total del evento (PTE) evidencia una respuesta hidrológica diferenciada entre ambas microcuencas, caracterizada por una tendencia a la dispersión de los datos. Este comportamiento sugiere que, si bien la precipitación actúa como el principal detonante del escurrimiento, no explica por sí sola la magnitud de los caudales máximos. La variabilidad observada refleja la influencia de condiciones hidrológicas antecedente y de las características físicas y de manejo de ambas microcuencas, tales como la humedad del suelo, la capacidad de infiltración y la presencia de estructuras de retención, las cuales modulan la generación y concentración del flujo ante eventos de lluvia (Ogden y Dawdy, 2003).

¹ Pérez, H. C. D. (2017). Efectos acumulativos en la microcuenca La Joya: Evaluación de obras y prácticas de conservación. Tesis de Maestría en Ciencias. Universidad Autónoma de Querétaro. Facultad de Ciencias Naturales. Querétaro, México. Disponible en <http://ri-ng.uaq.mx/handle/123456789/1578>

Cuadro 2. Características de la lluvia y el escurrimiento para eventos en pares en las microcuencas forestales Ichupio y Malacate.
Table 2. Rainfall and runoff characteristics for paired events in the Ichupio and Malacate forest small catchments.

No.	Fecha	PTE		PP2D		TPRE		IP30		LESC		TESC	
		Ichupio	Malacate	Ichupio	Malacate	Ichupio	Malacate	Ichupio	Malacate	Ichupio	Malacate	Ichupio	Malacate
		mm				min		mm h ⁻¹		mm		min	
1	22-jul-15	12.6	8.0	13.6	7.4	35.1	27.3	24.4	17.6	0.14	0.64	123	168
2	26-jul-15	11.2	11.0	19.4	5.4	90.1	69.2	16.6	18.0	0.54	1.57	210	315
3	01-ago-15	22.6	24.8	3.2	3.4	28.1	31.1	48.4	49.2	0.45	1.96	180	285
4	04-ago-15	14.0	16.2	10.2	7.6	27.3	30.4	30.7	32.0	1.09	3.26	240	477
5	22-ago-15	7.8	18.0	24.0	11.8	60.3	66.6	14.0	24.4	0.54	1.03	207	333
6	02-sep-15	17.0	17.4	4.4	6.2	41.1	27.7	32.0	38.7	0.24	1.51	258	342
7	04-sep-15	12.8	14.0	17.8	18.8	122.1	100.2	10.5	16.4	0.12	1.13	198	435
8	12-ago-16	24.4	18.2	2.2	2.8	73.1	269.5	36.5	20.4	1.70	3.03	216	528
9	28-sep-16	20.2	16.4	13.2	5.0	156.2	170.3	12.4	9.6	0.53	1.37	210	225
10	24-jul-22	12.6	11.8	33.6	29.0	32.7	30.5	24.8	23.6	0.29	0.82	96	246
11	30-jul-22	6.2	7.6	10.8	18.6	70.9	76.1	11.8	15.5	0.15	1.69	99	321
12	12-ago-22	7.6	9.0	23.6	24.0	71.3	65.1	14.0	13.6	0.03	0.56	48	228
13	14-ago-22	11.4	6.0	33.2	35.6	29.0	15.8	23.6	22.8	0.10	0.75	165	348
Total/ promedio		180.4	178.4	16.1	13.5	64.4	75.4	23.1	23.2	5.90	19.30	173.1	327.0

PTE = precipitación total del evento; PP2D = precipitación previa de 2 días; TPRE = tiempo de precipitación; IP30 = intensidad de la precipitación en 30 minutos; LESC = lámina de escurrimiento; TESC = tiempo de escurrimiento.

PTE = total rainfall of the event; PP2D = previous rainfall of 2 days; TPRE = rainfall time; IP30 = rainfall intensity in 30 minutes; LESC = runoff; TESC = runoff time.

Cuadro 2. Características de la lluvia y el escurrimiento para eventos en pares en las microcuencas forestales Ichupio y Malacate (continuación).
Table 2. Rainfall and runoff characteristics for paired events in the Ichupio and Malacate forest small catchments (continuation).

No.	Fecha	EMAX		EMED		TRESP		TDES		TEMAX	
		Ichupio	Malacate	Ichupio	Malacate	Ichupio	Malacate	Ichupio	Malacate	Ichupio	Malacate
		1 s ⁻¹						min			
1	22-jul-15	62.8	266.2	18.1	92.4	67.5	58.6	155.4	199.3	70.5	73.6
2	26-jul-15	229.5	342.1	43.2	122.4	46.2	30.6	166.1	276.4	49.2	66.6
3	01-ago-15	208.9	857.0	41.7	169.6	31.6	37.6	183.5	291.6	55.6	49.6
4	04-ago-15	638.2	1058.7	76.5	170.4	26.1	24.0	238.8	470.6	38.1	42.0
5	22-ago-15	315.7	345.2	42.7	76.3	29.3	24.1	176.0	290.5	32.3	27.1
6	02-sep-15	112.7	532.3	16.4	109.2	55.1	45.4	272.0	359.7	64.1	57.4
7	04-sep-15	27.1	316.7	9.9	65.4	100.3	90.1	176.2	425.0	157.3	132.1
8	12-ago-16	675.2	731.8	78.7	144.1	36.2	47.4	161.9	305.9	39.2	95.4
9	28-sep-16	189.8	473.1	48.8	153.9	124.6	141.5	178.4	196.1	142.6	159.5
10	24-jul-22	165.2	332.6	48.9	81.7	62.3	41.5	125.6	257.1	65.3	68.6
11	30-jul-22	81.5	532.0	25.3	129.6	69.2	15.5	97.3	260.6	78.2	51.6
12	12-ago-22	22.4	271.3	8.6	59.8	121.6	94.6	98.3	257.3	127.6	103.4
13	14-ago-22	66.6	208.3	10.0	53.2	35.3	15.8	171.4	348.0	41.4	33.7
Total/ promedio		215.1	482.1	36.1	109.8	61.9	51.3	169.3	302.9	73.9	73.9

EMAX = escurrimiento máximo; EMED = escurrimiento medio; TRESP = tiempo de respuesta (inicio de la precipitación a inicio del escurrimiento); TDES = tiempo de descarga (término de precipitación a término del escurrimiento); TEMAX = tiempo a escurrimiento máximo (inicio de la precipitación hasta alcanzar el escurrimiento máximo).

EMAX = maximum runoff; EMED = average runoff; TRESP = response time (rainfall onset to runoff onset); TDES = discharge time (rainfall termination to runoff termination); TEMAX = time to maximum runoff (rainfall onset to maximum runoff).

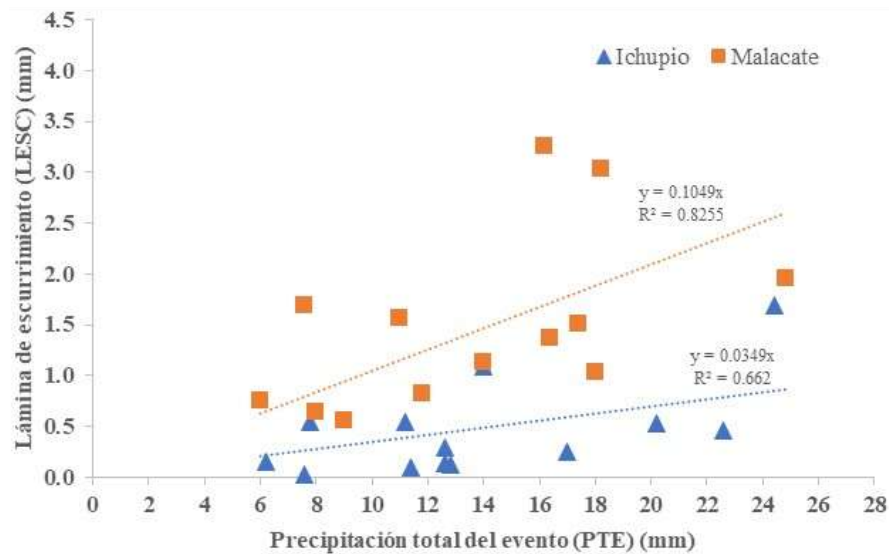


Figura 3. Relación entre la Precipitación Total del Evento (PTE) y la Lámina de Escurrimiento (LESC) en las microcuencas forestales Ichupio y Malacate.

Figure 3. Relationship between Total Rainfall Event (PTE) and Runoff (LESC) in the Ichupio and Malacate forest small catchments.

Sin embargo, estos resultados sugieren que por las presas establecidas en Ichupio predominan los procesos de infiltración y amortiguamiento de caudales, lo cual es consistente con lo reportado por Suryatmojo (2015) y Hopkins, Loperfido, Craig, Noe y Hogan (2017). Este comportamiento indica que las estructuras de retención no solo interceptan el flujo superficial, sino que favorecen la recarga hídrica al incrementar el tiempo de concentración del agua en el sistema, permitiendo una mayor interacción con el suelo y, por ende, mayores tasas de infiltración. En este contexto, la reducción observada en las láminas y picos de escurrimiento en Ichupio puede interpretarse como una respuesta hidrológica más regulada, en la que parte del volumen de precipitación es retenido temporalmente o transferido hacia flujos subsuperficiales.

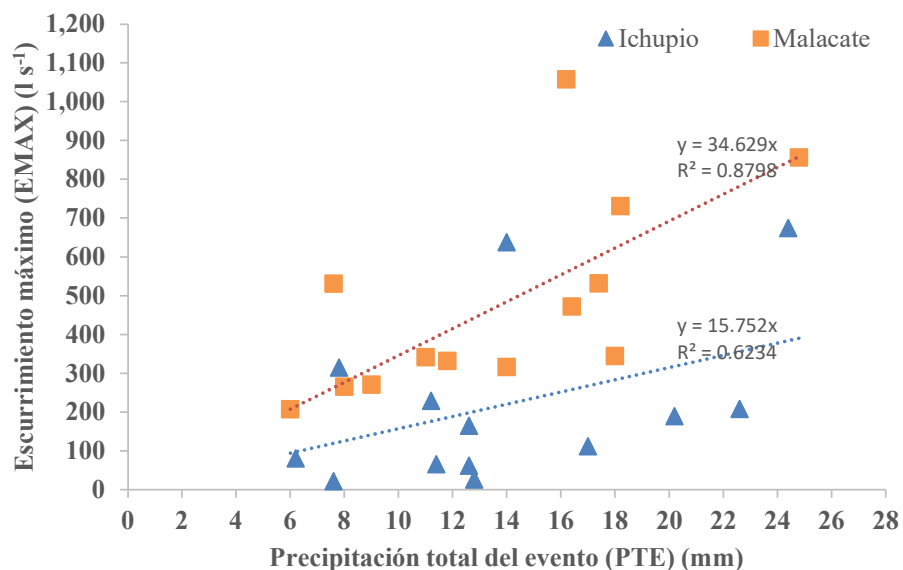


Figura 4. Relación entre la Precipitación Total del Evento (PTE) y el Escurrimiento Máximo (EMAX) en las microcuencas forestales Ichupio y Malacate.

Figure 4. Relationship between Total Rainfall Event (PTE) and Maximum Runoff (EMAX) in the Ichupio and Malacate forest small catchments.

El análisis del escurrimiento máximo permitió evidenciar el efecto de las presas de control en la regulación de los caudales y en el incremento del tiempo de concentración. Estas estructuras modifican la conectividad hidrológica de la microcuenca al interrumpir la continuidad del flujo, generando retardos en la propagación de la escorrentía y disminuyendo la eficiencia del transporte hídrico hacia la salida. Como consecuencia, se reduce la velocidad del flujo, se atenúan los picos de caudal y se disminuyen la duración del escurrimiento, favoreciendo una respuesta más gradual del sistema caudal, ello coincide con los resultados reportados por Van Loon et al. (2019) y Kang y Sharma (2024).

Además, estos efectos no solo dependen de la presencia de las presas, sino también de su interacción con otras variables hidrometeorológicas, como la intensidad de la precipitación y la humedad antecedente del suelo. Bajo eventos de alta intensidad, las presas pueden funcionar como elementos de amortiguamiento parcial, mientras que en eventos de menor magnitud contribuyen de manera más significativa a la retención y regulación del flujo. Los resultados evidencian que la implementación de infraestructura de conservación en Ichupio no solo reduce el escurrimiento superficial, sino que también modifica los procesos hidrológicos dominantes, promoviendo un sistema más resiliente frente a eventos de precipitación variables.

En general, la lámina de escurrimiento del evento (LESC), el escurrimiento máximo (EMAX) aumentaron con la magnitud de la precipitación, sin embargo, se observa dispersión de los datos en ambas variables, siendo más evidente en la microcuenca Ichupio donde LESC presenta una varianza (VAR) de 0.22 y un coeficiente de variación (CVA) de 103.48% comparada con la microcuenca Malacate donde la VAR es de 0.73 y un CVA de 57.38%. En el caso del escurrimiento máximo (EMAX), la situación es similar, ya que se obtiene un CVA de 99.57 y 53.38% para la microcuenca Ichupio y Malacate, respectivamente. Estas dispersiones evidencian que la relación entre precipitación y escurrimiento no es lineal, sino que está modulada por múltiples variables. La humedad antecedente del suelo condiciona su capacidad de infiltración, suelos secos que favorecen la retención de agua, mientras que suelos saturados generan escurrimiento incluso con lluvias de baja magnitud. La intensidad de la lluvia también es determinante, ya que eventos intensos pueden superar la capacidad de infiltración y producir respuestas rápidas, mientras que lluvias de menor intensidad favorecen la infiltración y el flujo subsuperficial.

Asimismo, la cobertura vegetal regula el balance hídrico mediante relación entre bosque y sotobosque, la interceptación del dosel, el aumento de la rugosidad superficial y cambios en la porosidad del suelo, son efectos que varían estacionalmente. En conjunto, la interacción de estos factores explica la dispersión observada, reflejando la complejidad de los procesos que controlan el escurrimiento (Beven, 2012).

Se realizó un análisis de regresión múltiple con el propósito de identificar las variables que influyen de manera más significativa en la generación de escurrimiento superficial. Se utilizó como variable dependiente la lámina de escurrimiento y como variables independientes las características de la lluvia y los tiempos de escurrimiento del Cuadro 2. Se optó por LESC para evaluar el efecto de la infraestructura de captación en Ichupio en términos de las lecturas medias del evento, en vez de sus valores únicos máximos instantáneos (EMAX), asumiendo la media de los registros de todo el evento de escurrimiento (LESC) como más representativo.

Este enfoque permitió evaluar la relación entre los parámetros hidrometeorológicos y la respuesta hidrológica de cada microcuenca, bajo condiciones contrastantes de manejo y conservación del suelo. El análisis se enfocó en determinar cuáles de estas variables explican con mayor precisión el comportamiento del escurrimiento en cada microcuenca, considerando las diferencias estructurales en la microcuenca Ichupio, en comparación con la microcuenca Malacate, que no cuenta con obras de retención. Los resultados indicaron que únicamente cuatro variables mostraron una relación estadísticamente significativa y consistente en ambas microcuencas: la precipitación total del evento (PTE), la precipitación previa de 2 días (PP2D), la intensidad de la precipitación en 30 minutos (IP30) y el tiempo de escurrimiento (TESC). Estas variables resultaron determinantes para explicar la dinámica del escurrimiento, ya que integran tanto la magnitud como la temporalidad de los eventos de lluvia y reflejan la capacidad de respuesta de ambas microcuencas ante distintas condiciones de humedad antecedente y retención superficial.

La ecuación que se obtiene para la microcuenca Ichupio tiene un $R^2 = 0.4277$ y su expresión es:

$$LESC = -0.2725 + 0.0282PTE - 0.0049PP2D + 0.0024IP30 + 0.0021TESC \quad (1)$$

Y para la microcuenca Malacate el $R^2 = 0.7844$ y la ecuación queda como:

$$LESC = 0.1763 - 0.0190PTE - 0.0399PP2D + 0.0130IP30 + 0.0055TESC \quad (2)$$

Donde LESC, PTE y PP2D están en mm, IP30 en mm h⁻¹ y TESC en min.

La representación gráfica de los resultados obtenidos con los modelos de regresión múltiple, se presentan en la Figura 5, donde se observan las láminas de escurrimiento medidas y las estimadas con su $R^2 = 0.9498$ y 0.7155 (relación 1:1), para las microcuencas Malacate e Ichupio, respectivamente.

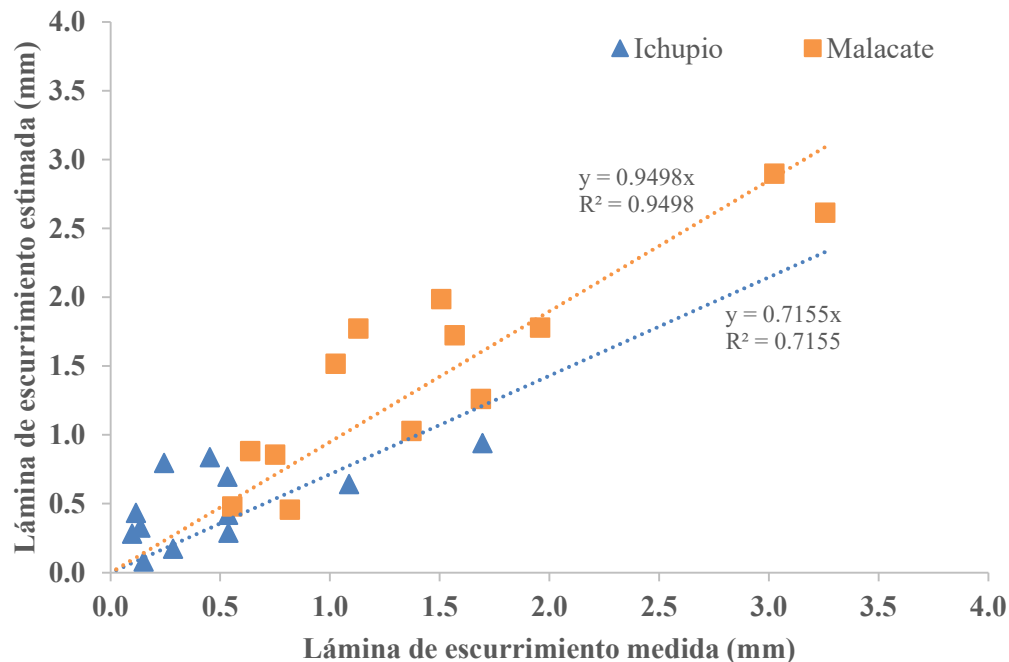


Figura 5. Relación entre las láminas de escurrimiento medidas y estimadas a partir de los modelos de regresión múltiple en las microcuencas forestales Ichupio y Malacate.

Figure 5. Relationship between the measured and estimated runoff from multiple regression models in the Ichupio and Malacate forest small catchments.

Por otra parte, los coeficientes de determinación (R^2) obtenidos en la Figura 6, de 0.9252 para la microcuenca Ichupio y 0.8692 para Malacate, indican un alto grado de ajuste del modelo de regresión entre la lámina de escurrimiento estimada y la precipitación total del evento (PTE). En el caso de Ichupio, el modelo explica el 92.52% de la variabilidad del escurrimiento, lo que evidencia una relación muy fuerte y una alta capacidad predictiva. Por su parte, en Malacate el modelo explica el 86.92% de la variabilidad, lo cual también representa un ajuste robusto, aunque ligeramente menor.

Estos resultados confirman que la PTE es un predictor sólido del comportamiento hidrológico en ambas microcuencas; sin embargo, la diferencia en los valores de R^2 sugiere que en Ichupio la respuesta hidrológica es más consistente y predecible. Esto puede atribuirse a la presencia de obras de conservación que regulan el flujo, favorecen la infiltración y reducen la variabilidad del escurrimiento. En contraste, en Malacate, donde no existen estas estructuras, el escurrimiento presenta una mayor variabilidad y está influenciado por factores hidrometeorológicos y características del sitio.

La descarga máxima y la forma del hidrograma reflejan la influencia de la tasa de precipitación, su variabilidad espacio-temporal y las características de la cuenca, como la humedad antecedente del suelo, la capacidad de infiltración, las elevaciones de la capa freática, el uso y la cubierta del suelo, la topografía y, las propiedades de la red de drenaje, así como la escala o tamaño de la cuenca (Ogden y Dawdy, 2003).

Al analizar los hidrogramas en pares es posible identificar información complementaria como el escurrimiento máximo, los tiempos de retraso en el inicio del escurrimiento y las diferencias en los tiempos de descarga, hasta su finalización. Estas variaciones se manifiestan de manera distinta en ambas microcuencas y es atribuyen a la presencia de presas en la microcuenca Ichupio.

En la Figura 7 se presentan los hidrogramas correspondientes a pares de eventos tipo, que ilustran la respuesta hidrológica y el comportamiento del escurrimiento en cada microcuenca. Se observa que el escurrimiento máximo registrado en la microcuenca Malacate fue entre dos y cuatro veces superior al observado en Ichupio. En relación con el inicio del escurrimiento, se identificó un retraso de entre 12 y 30 minutos en Ichupio, pese a que la lluvia se presentó de manera casi simultánea en ambas microcuencas y con intensidades comparables (Pérez, 2017¹).

El tiempo para alcanzar el caudal máximo fue menor en los eventos correspondientes a Malacate, lo que indica una mayor rapidez en la concentración del flujo respecto a Ichupio. Asimismo, una vez concluido el escurrimiento en Ichupio, en Malacate éste se prolongó entre hora y media y hasta casi tres horas adicionales. En ciertos eventos, el escurrimiento en Ichupio inició de forma simultánea o incluso anterior a Malacate, e inclusive con mayor intensidad de precipitación; no obstante, el volumen de escurrimiento fue inferior y la duración del evento menor.

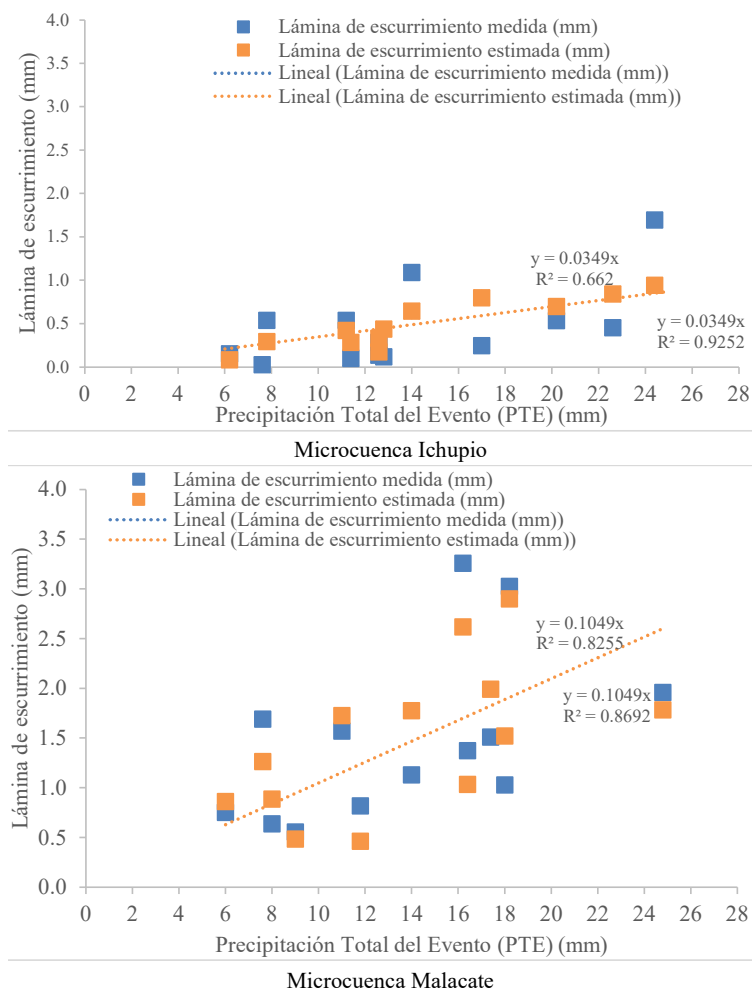


Figura 6. Relación entre las láminas de escurrimiento medidas y las estimadas a partir de la ecuación del modelo de regresión múltiple para la precipitación total del evento (PTE) en las microcuencas forestales Ichupio y Malacate.

Figure 6. Relationship between measured runoff sheets and those estimated from the multiple regression model equation for total event precipitation (PTE) in the Ichupio and Malacate forest small catchments.

Estas diferencias evidencian que la respuesta hidrológica de ambas microcuencas fue disímil aún bajo condiciones similares de cantidad de precipitación, duración del evento, intensidad y precipitación antecedente (Suryatmojo *et al.*, 2013). Dicho comportamiento se atribuye a la presencia de presas de conservación en cauces y cárcavas de la microcuenca Ichupio, las cuales favorecen la retención temporal del flujo superficial, reducen la velocidad del escurrimiento y contribuyen a disminuir los volúmenes de salida.

También se agruparon los eventos considerando el rango de precipitación total del evento (PTE) y se realizó un análisis para determinar cómo influye la cantidad de precipitación en la respuesta de las variables de la precipitación y el escurrimiento en cada microcuenca. Los resultados se presentan en el Cuadro 3.

Los resultados muestran que, en ambas microcuencas, las intensidades de precipitación en 30 minutos y las precipitaciones acumuladas en los dos días previos fueron similares para cada rango de precipitación. Se observó que, en eventos de menor precipitación, fue necesaria una mayor humedad antecedente del suelo para generar escurrimiento, lo que indica que un perfil húmedo favorece este proceso. Por el contrario, en eventos de mayor precipitación, asociados con intensidades más elevadas en 30 minutos, aun con menor humedad previa en el suelo, las condiciones fueron suficientes para producir escurrimiento. En general, el incremento en la cantidad e intensidad de la precipitación se reflejó en mayores volúmenes de escurrimiento, expresados en lámina, gasto máximo, gasto medio y tiempo de escurrimiento (Suryatmojo *et al.*, 2014).

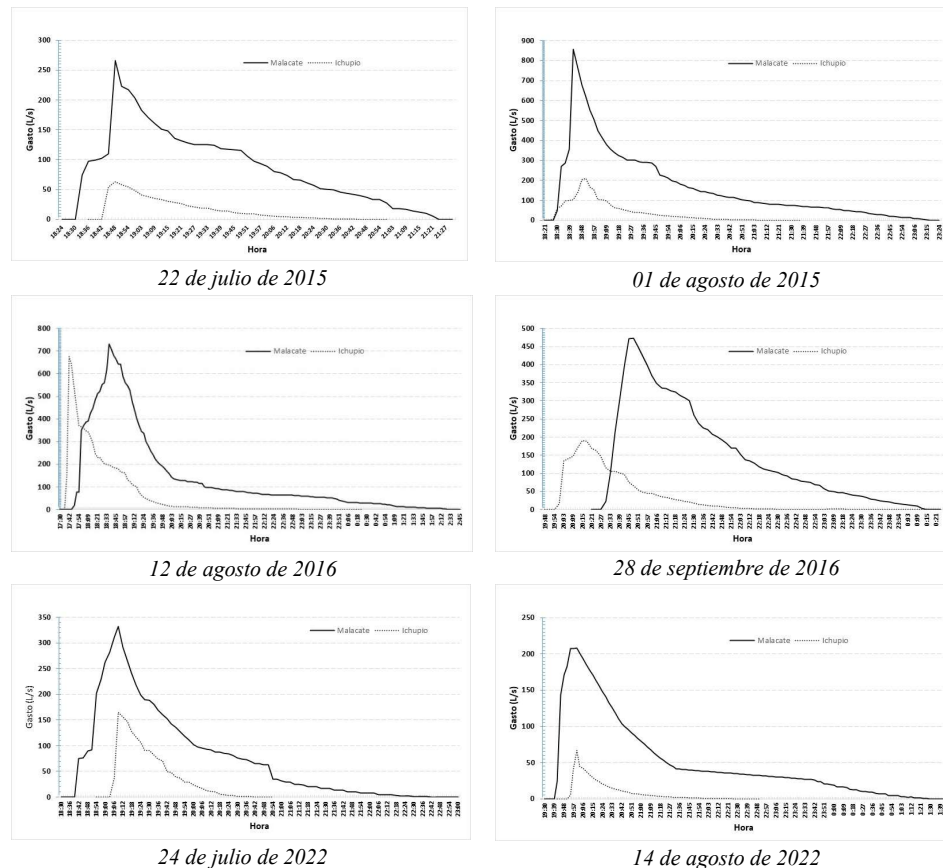


Figura 7. Hidrogramas en pares de eventos tipo de escurrimiento registrados en las microcuencas forestales Ichupio y Malacate.
Figure 7. Hydrographs in pairs of runoff events recorded in the Ichupio and Malacate forest small catchments.

Al comparar los resultados entre ambas microcuencas, se evidenció que la microcuenca Ichupio presentó valores de escurrimiento menores en todas las variables analizadas. Esta diferencia se atribuye al efecto de las estructuras de control de escurrimientos y sedimentos, las cuales interrumpen la continuidad del flujo, favorecen la retención de agua y sedimentos, y disminuyen la energía de los caudales. En consecuencia, estas obras contribuyen a amortiguar las láminas de escurrimiento, reducir los picos de gasto y disminuir el tiempo de escurrimiento, lo que se traduce en una respuesta hidrológica más regulada y estable frente a los eventos de precipitación.

Cuadro 3. Características de la lluvia y el escurrimiento promedios considerando el rango de precipitación total del evento (PTE) (mm) para los eventos registrados durante tres años de evaluación en las microcuencas forestales Ichupio y Malacate.

Table 3. Average rainfall and runoff characteristics considering the range of total rainfall of the event (PTE) (mm) for the events recorded during three years of evaluation in the Ichupio and Malacate forest small catchments.

Rango de precipitación total del evento (PTE) (mm)	PP2D		LESC		IP30		TESC		EMAX		EMED	
	Ichupio	Malacate	Ichupio	Malacate	Ichupio	Malacate	Ichupio	Malacate	Ichupio	Malacate	Ichupio	Malacate
	----- mm -----				--- mm h ⁻¹ ---		--- min ---		----- 1 s ⁻¹ -----			
>10	21.30	21.40	0.24	0.91	13.26	17.37	118.00	266.25	139.89	319.43	25.54	83.75
10 a 15	19.47	17.73	0.38	1.17	21.76	19.33	172.00	332.00	198.22	330.46	34.44	89.83
>15	5.75	6.13	0.73	2.02	32.33	30.72	216.00	365.00	296.66	666.34	46.39	137.25

PP2D = precipitación previa de 2 días; LESE = lámina de escurrimiento; IP30 = intensidad de la precipitación en 30 minutos; TESC = tiempo de escurrimiento; EMAX= escurrimiento máximo; EMED = escurrimiento medio.

PP2D = previous rainfall of 2 days; LESE = runoff; IP30 = rainfall intensity in 30 minutes; TESC = runoff time; EMAX= maximum runoff; EMED = average runoff.

CONCLUSIONES

Las obras de conservación agua y suelo modificaron de manera significativa la respuesta hidrológica en la microcuenca Ichupio, lo cual se observó principalmente en la reducción escurrimiento directo y la descarga máxima. Se concluye que las presas son eficaces para controlar las respuestas hidrológicas asociadas con la lámina de escurrimiento y los escurrimientos máximos y medios. En este caso, la eficiencia para el control del escurrimiento fue del 69.43%, lo que indica que una mayor proporción de la lluvia precipitada en la microcuenca se "queda" en el sistema como infiltración, humedad del suelo, aprovechamiento de humedad y recarga del acuífero.

El efecto de las presas en cauces y cárcavas se reflejó también en los tiempos de respuesta hidrológica, ya que en Ichupio el escurrimiento inició entre 12 y 30 minutos después que en la microcuenca testigo Malacate. Asimismo, se observó una mayor retención del agua e infiltración, de modo que el escurrimiento en Ichupio concluyó antes, mientras que en Malacate se prolongó entre 1.5 y 3 horas adicionales. Estas diferencias fueron evidentes en los gastos y en los hidrogramas de los eventos analizados, aun cuando las condiciones de precipitación fueron similares en ambas microcuencas.

Los resultados mostraron que la magnitud del escurrimiento depende de la interacción entre la precipitación total e intensidad, la cobertura forestal, el tratamiento de conservación aplicado y las características propias de cada microcuenca. El modelo de regresión múltiple permitió identificar que las variables con mayor influencia en la generación de escurrimiento fueron la precipitación total del evento (PTE), la precipitación previa de dos días (PP2D), la intensidad en 30 minutos (IP30) y el tiempo de escurrimiento (TESC), siendo la PTE el predictor más robusto. Los altos valores de R^2 (0.9252 para Ichupio y 0.8692 para Malacate) confirman la precisión del modelo y su utilidad para estimar láminas de escurrimiento bajo condiciones hidrometeorológicas similares.

Después de ocho años del establecimiento de las presas y de la recuperación progresiva de la cubierta forestal, los resultados confirman que estas estructuras siguen reduciendo de manera significativa el escurrimiento directo, lo que demuestra su eficacia como infraestructura natural para la regulación del flujo superficial, la reducción de la erosión y la mejora de la estabilidad hidrológica en microcuencas forestales.

En conjunto, estos resultados cumplen con el objetivo del estudio al evidenciar que la respuesta hidrológica está controlada tanto por las condiciones hidrometeorológicas como por las intervenciones de conservación en cárcavas y cauces, siendo estas últimas un factor clave en la regulación del escurrimiento y en el fortalecimiento de la funcionalidad hidrológica de la microcuenca Ichupio.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los conjuntos de datos utilizados o analizados durante el estudio actual están disponibles del autor correspondiente a solicitud razonable.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

FINANCIACIÓN

No aplicable.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización: P.R.R., J.E.R.P., D.S.F.R. y J.V.P.H.; Metodología: P.R.R., D.S.F.R. y J.V.P.H.; Software: D.S.F.R.; Análisis formal: P.R.R., D.S.F.R. y J.V.P.H.; Escritura - preparación del borrador original: P.R.R., J.E.R.P., D.S.F.R., C.M.P., J.V.P.H. y A.K.G.; Escritura - revisión y edición: P.R.R., J.E.R.P., D.S.F.R., C.M.P., J.V.P.H. y A.K.G.

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua por las facilidades otorgadas y la oportunidad para llevar a cabo la investigación, el registro y la recopilación de datos e información en las microcuencas forestales pareadas instrumentadas Ichupio y Malacate que se estableció con proyectos internos de investigación.

LITERATURA CITADA

- Andréassian, V. (2004). Water and forests: from historical controversy to scientific debate. *Journal of Hydrology*, 291, 1-27. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2003.12.015>
- Andréassian, V., Lerat, J., Le Moine, N., & Perrin, C. (2012). Neighbors: Nature's own hydrological models. *Journal of Hydrology*, 414, 49-58. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.10.007>
- Atalar, F., Beyazoglu, O., Fernald, A. G., Burney, O. T., VanLeeuwen, D. M., & Cram, D. S. (2021). A case study of runoff and sediment yield in areas subjected to different forest thinning operations in a northern New Mexico forest. *Journal of Soil and Water Conservation*, 76(4), 293-302. <https://doi.org/10.2489/jswc.2021.00135>
- Beven, K. (2012). *Rainfall-runoff modelling: The primer* (2nd ed.). Chichester, UK: John Wiley & Sons Ltd.
- Bosch, J., & Hewlett, J. (1982). A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *Journal of Hydrology*, 55(1-4), 3-23. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(82\)90117-2](https://doi.org/10.1016/0022-1694(82)90117-2)
- Brown, A. E., Zhang, L., McMahon, T. A., Western, A. W., & Vertessy, R. A. (2005). A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation. *Journal of Hydrology*, 310(1-4), 28-61. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.12.010>
- Clausen, J. C., & Spooner, J. (1993). *Paired Watershed Study Design*. Washington, D.C., USA: Office of Wetlands, Oceans and Watersheds. Environmental Protection Agency.
- Chang, Y., Liu, X., Cao, B., Wang, Y., & Shen, Y. J. (2024). Effects of vegetation restoration on runoff and its components in the mountainous Haihe River Basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 53, 101803. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101803>
- Chow, L., Xing, Z., Benoy, G., Rees, H. W., Meng, F., Jiang, Y., & Daigle, J. L. (2011). Hydrology and water quality across gradients of agricultural intensity in the Little River watershed area, New Brunswick, Canada. *Journal of Soil and Water Conservation*, 66(1), 71-84. <https://doi.org/10.2489/jswc.66.1.71>
- Çtgez, T., Karagül, R., & Özcan, M. (2021). Evaluation of the effects of some watershed characteristics on water and suspended sediment yield in agricultural and forest dominated watersheds. *Şumarski list*, 145(5-6), 249-260. <https://doi.org/10.31298/sl.145.5-6.4>
- Hibbert, A. (1967). Forest treatment effects on water yield. In W. E. Sopper & H. W. Lull (Eds.). *International symposium on forest hydrology* (pp. 527-543). Oxford, UK: Pergamon Press.
- Hopkins, K. G., Loperfido, J. V., Craig, L. S., Noe, G. B., & Hogan, D. M. (2017). Comparison of sediment and nutrient export and runoff characteristics from watersheds with centralized versus distributed stormwater management. *Journal of Environmental Management*, 203, 286-298. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.07.067>
- Kang, T. H., & Sharma, A. (2024). A state-controlled hypothesis test for paired-watershed experiments. *Journal of Hydrology*, 640, 131664. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131664>
- Lacombe, G., Ribolzi, O., De Rouw, A., Pierret, A., Latsachak, K., Silvera, N., ... & Valentin, C. (2016). Contradictory hydrological impacts of afforestation in the humid tropics evidenced by long-term field monitoring and simulation modelling. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(7), 2691-2704. <https://doi.org/10.5194/hess-20-2691-2016>
- Martínez-Fernández, J., Ceballos-Barbancho, A., Hernández-Santana, V., Casado-Ledesma, S., & Morán-Tejeda, C. (2005). Procesos hidrológicos en una cuenca forestal del Sistema Central: Cuenca Experimental de Rinconada. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 31, 7-25. <https://doi.org/10.18172/cig.1171>
- Ogden, F., & Dawdy, D. (2003). Peak Discharge Scaling in Small Hortonian Watershed. *Journal of Hydrologic Engineering*, 8(2), 64-73. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2003\)8:2\(64\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2003)8:2(64))
- Richardson, P. W., Cafferata, P. H., Dymond, S. F., Keppeler, E. T., Wagenbrenner, J. W., & Whiting, J. A. (2023). Past and future roles of paired watersheds: a North American inventory and anecdotes from the Caspar Creek Experimental Watersheds. *Frontiers in Forests and Global Change*, 6, 1275392. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2023.1275392>
- Serrano, M. M. O., Regües, D., Latrón, J., Martí, N. C., Lana-Renault, N., & Nadal, R. E. (2005). Respuesta hidrológica de una cuenca forestal en la montaña media pirenaica: el caso de San Salvador. *Cuaderno de Investigación Geográfica*, 31, 59-76.
- Shi, C., Yuan, S., Shi, C., & Zhao, T. (2018). Estimating the Effect of Precipitation and Vegetation on Water Yield in Northern China. *Polish Journal of Environmental Studies*, 27(1), 305-311. <https://doi.org/10.15244/pjoes/75814>
- Sriwongsitanon, N., & Taesombat, W. (2011). Effects of land cover on runoff coefficient. *Journal of Hydrology*, 410, 226-238. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.09.021>
- Suryatmojo, H., Masamitsu, F., Kosugi, K. I., & Mizuyama, T. (2013). Effects of selective logging methods on runoff characteristics in paired small headwater catchment. *Procedia Environmental Sciences*, 17, 221-229.
- Suryatmojo, H., Fujimoto, M., Kosugi, K., & Mizuyama, T. (2014). Runoff and soil erosion characteristics in different periods of an intensive forest management system in a tropical Indonesian rainforest. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 9(6), 830-846.
- Suryatmojo, H. (2015). Rainfall-runoff investigation of pine forest plantation in the upstream area of Gajah Mungkur reservoir. *Procedia Environmental Sciences*, 28, 307-314. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2015.07.039>
- Van Loon, A. F., Rangelcroft, S., Coxon, G., Brena Naranjo, J. A., Van Ogtrop, F., & Van Lanen, H. A. (2019). Using paired catchments to quantify the human influence on hydrological droughts. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(3), 1725-1739. <https://doi.org/10.5194/hess-23-1725-2019>
- Vose, J. M., Sun, G., Ford, C. R., Bredemeier, M., Otsuki, K., Wei, X., ... & Zhang, L. (2011). Forest ecohydrological research in the 21st century: what are the critical needs?. *Ecohydrology*, 4(2), 146-158. <https://doi.org/10.1002/eco.193>
- Zhang, M., & Wei, X. (2014). Contrasted hydrological responses to forest harvesting in two large neighboring watersheds in snow hydrology dominant environment: implications for forest management and future forest hydrology studies. *Hydrological Processes*, 26, 6183-6195. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.10107>
- Zhang, M., Liu, N., Harper, R., Li, Q., Liu, K., Wei, X., ... & Liu, S. (2017). A global review on hydrological responses to forest change across multiple spatial scales: Importance of scale, climate, forest type and hydrological regime. *Journal of Hydrology*, 546, 44-59. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.12.040>