

RESPUESTA HIDROLÓGICA DE MICROCUENCAS FORESTALES EN LA CUENCA DEL LAGO DE PÁTZCUARO, MICHOACÁN

Pedro Rivera Ruiz^{1,4*}; Juan Enrique Rubiños Panta²; Demetrio Salvador Fernández Reynoso²; Cándido Mendoza Pérez²; Jorge Víctor Prado Hernández³; Ulises Dehesa Carrasco⁴

¹Estudiante de Doctorado del Colegio de Postgraduados, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac No. 8532, C.P. 62550, Jiutepec, Morelos.

Correo electrónico - pedro.rivera@colpos.mx y privera@tlaloc.imta.mx

²Colegio de Postgraduados, Carretera México-Texcoco Km. 36.5, C.P. 56230, Montecillo, Texcoco, Edo. de México

³Universidad Autónoma Chapingo, Carretera México-Texcoco Km. 38.5, C.P. 56230, Chapingo, Texcoco, Edo. de México

⁴Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac No. 8532, C.P. 62550, Jiutepec, Morelos.

Resumen

Se evaluó la respuesta hidrológica de dos microcuencas forestales de la cuenca del Lago de Pátzcuaro: la microcuenca Ichupio en la que se establecieron obras y prácticas conservacionistas y la microcuenca Malacate que es la “testigo”. Ambas microcuencas se instrumentaron con pluviómetros digitales para registrar la lluvia y con sensores ultrasónicos para registrar el gasto. Se registraron veinte eventos de escurrimiento en la microcuenca Malacate y nueve eventos en la microcuenca Ichupio. Se analizaron cinco eventos en pares donde en ambas microcuencas se presentó el escurrimiento superficial, y al realizar el análisis del proceso lluvia-escurrimiento, se encontró que en la microcuenca Malacate se presentaron los mayores valores de escurrimiento (volumen, lámina, coeficiente, máximo y medio) aun cuando en ambas microcuencas se presentaron similares cantidades e intensidades de lluvia. Un factor determinante para que se presentará el escurrimiento fue la cantidad de lluvia precipitada de cinco días previos, y se determina el efecto en la respuesta hidrológica por la presencia de las obras (presas de gaviones, piedra y geocostales), al realizar el análisis de los hidrogramas en pares, donde se observó que en la microcuenca Ichupio se iniciaba el escurrimiento después de 30 a 40 minutos comparado con el tiempo de inicio en la microcuenca Malacate, y que también se extendiera el tiempo de escurrimiento de dos y hasta tres horas después de que finalizaba en la microcuenca Ichupio.

Palabras claves: escurrimiento, lluvia, obra conservacionista.

Introducción

Las interacciones entre las coberturas forestales y el agua se han estudiado durante más de un siglo. Se han publicado varias investigaciones clásicas sobre las respuestas hidrológicas al cambio forestal en cuencas con superficies $<100 \text{ km}^2$, que proporcionan una visión profunda del impacto del cambio forestal en el escurrimiento anual en cuencas pequeñas (Brown et al., 2005; van Dijk et al., 2012). Una conclusión general extraída de los estudios de cuencas pequeñas es que la deforestación (por ejemplo, el aprovechamiento forestal, la urbanización, el cambio de la cubierta del suelo, los incendios forestales y la afectación por plagas) puede aumentar el escurrimiento anual, mientras que la forestación o mantener y mejorar la cobertura forestal, afecta al flujo de los arroyos en sentido contrario (Beck et al., 2013; Zhang et al., 2015). Sin embargo, ha habido algunas respuestas inconsistentes, lo que sugiere que la intensidad de respuesta del escurrimiento anual al cambio de la cubierta forestal puede ser variable entre las cuencas hidrográficas, especialmente para las cuencas con forestación o reforestación o en las que se establecen obras y prácticas de manejo del agua y suelo (Lacombe et al., 2016).

Por tanto, se ha identificado que la relación entre la cobertura forestal y el escurrimiento superficial se tiene que investigar aún más, debido principalmente a la falta de datos de alta calidad sobre precipitaciones y caudales, y también para encontrar una metodología adecuada para excluir el impacto hidrológico de factores no forestales, como la variabilidad del clima y las actividades humanas (por ejemplo, la construcción de presas, las actividades agrícolas, el establecimiento de prácticas forestales y de conservación de agua y suelo, y la urbanización) (Wei y Zhang, 2010; Vose et al., 2011).

En los estudios de cuencas pequeñas, las grandes variaciones en la respuesta hidrológica al cambio forestal y en general también de la variación de la respuesta hidrológica de una cubierta forestal en el tiempo, se atribuyen a factores como el tipo de bosque, la topografía, el clima, los regímenes hidrológicos, el suelo, la geología y el manejo o prácticas forestales realizadas (Zhang y Wei, 2014). En la mayoría de los casos, los resultados inconsistentes de la respuesta hidrológica se atribuyen simplemente a la complejidad de los procesos de las cuencas y a la heterogeneidad del paisaje, el clima y la geología (Stednick, 1996; Vose et al., 2011).

Debido a la falta de una relación generalizada entre el bosque y el agua en las grandes cuencas hidrográficas, las relaciones empíricas entre los diferentes procesos y componentes de las cuencas hidrográficas procedentes de estudios de cuencas pequeñas se utilizan en gran medida en los modelos hidrológicos. Del mismo modo, la gestión de las cuencas hidrográficas a menudo se basa en una simple extrapolación de los conceptos y la información generada a partir de pequeñas cuencas hidrográficas a las grandes cuencas, lo que puede ser engañoso en la toma de decisiones (Zhang et al., 2016), sobre todo, si la procedencia de los datos no procede de investigaciones permanentes y consistentes en el tiempo. Este crítico vacío de información científica, junto con las crecientes necesidades de gestión y planificación de las cuencas

hidrográficas, exige una revisión sustancial de la ecohidrología forestal en múltiples escalas espaciales.

Durante la última década, se implementaron obras y prácticas conservacionistas de los recursos agua, suelo y bosque en microcuencas forestales de la cuenca del Lago de Pátzcuaro, y una incógnita que se tiene es el saber cuáles son los efectos que éstas tienen en la respuesta hidrológica, por lo que se establecieron dos microcuencas pareadas donde se evaluó de forma sistemática y continua los escurrimientos con el objeto de estudiar el funcionamiento hidrológico de las microcuencas y definir la respuesta hidrológica frente a eventos pluviométricos de diferente intensidad y determinar los factores que mejor explican el tipo de respuesta.

Materiales y Métodos

Ubicación de la zona de estudio

La zona de estudio se conforma de dos microcuencas pareadas, una de ellas es Ichupio (101.94 ha) la microcuenca a evaluar que es donde se han establecido prácticas y obras conservacionistas (presas de gaviones, piedra acomodada, geocostales, reforestaciones, etc.), y la otra es la microcuenca “testigo” que corresponde a la microcuenca donde no se han realizado acciones y obras conservacionistas (Malacate con 149.25 ha). Ambas microcuencas cuentan con un uso de suelo predominante forestal (del 74 al 79% de la superficie), con áreas de pastizal (11 al 18%) y agricultura (1 al 3%). En la Figura 1, se presenta la ubicación de las microcuencas pareadas, en el municipio de Tzintzuntzan en la cuenca del Lago de Pátzcuaro.

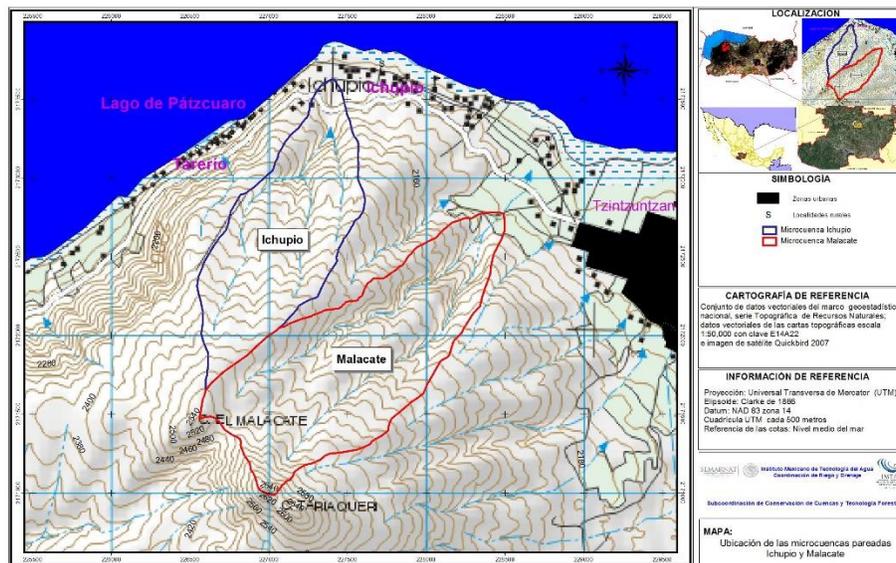


Figura 1. Ubicación de las microcuencas Ichupio y Malacate.

Registro de lluvia y escurrimiento

Para el registro de datos, ambas microcuencas se instrumentaron con pluviómetros digitales HOBO para la medición de la precipitación que contienen un data logger donde se registran los datos con precisión de 0.2 mm de lluvia, y la construcción de un aforador de garganta larga (Figura 2) equipado con un sensor ultrasónico (Figura 3) con tecnología desarrollada en el IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua) que cada 3 minutos registra el nivel del agua y lo convierte a gasto (escurrimiento superficial).



Figura 2. Aforador de garganta larga para medición de los escurrimientos.



Figura 3. Equipo con sensor ultrasónico para el registro de los escurrimientos.

Se registraron datos durante el año 2022, y se analizaron los eventos de escurrimiento en pares que se presentaron al mismo momento en ambas microcuencas con la finalidad de comparar la respuesta hidrológica de cada microcuenca.

Resultados y Discusión

Análisis de la medición de lluvia

En la Figura 4 se presenta gráficamente la precipitación mensual que se registró en las microcuencas Ichupio y Malacate durante el año 2022. En la microcuenca Ichupio llovieron un total de 739.4 mm y en la microcuenca Malacate un total de 751.6 mm, es decir, solamente existe una diferencia en lluvia de 12.2 mm entre ambas microcuencas, lo que indica que se presentaron eventos de lluvia muy similares.

Se observa que en la microcuenca Malacate durante los meses de junio a agosto se presentó una mayor cantidad de precipitación comparada con la presentada en la microcuenca Ichupio. Por otro lado, al realizar el análisis de los eventos de escurrimiento, se observó que las mejores condiciones para que éste se presentara era cuando en los 5 días previos al evento se presentaban días con lluvias que totalizaban más de 20 mm, lo que influía para que el perfil del suelo estuviera húmedo con lo que disminuía su capacidad de infiltración y por tanto una mayor posibilidad de que se presentara el escurrimiento superficial.

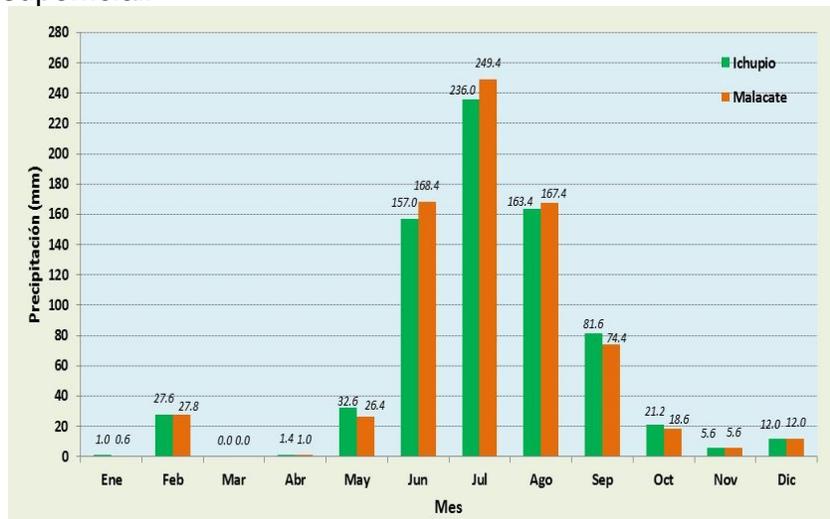


Figura 4. Precipitación mensual registrada en las microcuencas Ichupio y Malacate durante el año 2022.

Análisis de la respuesta hidrológica

Al igual que con la lluvia, también se pueden analizar los eventos de escurrimiento considerando la información básica obtenida con los equipos de medición de gasto instalados a la salida de cada microcuenca.

Debido a que en cada microcuenca se tienen condiciones de manejo distintas, ello se reflejó en el comportamiento del escurrimiento, ya que en el caso de la microcuenca Malacate que es en la que no se tienen establecidas prácticas y obras conservacionistas, se presentaron 20 eventos de escurrimiento y, en la microcuenca Ichupio que es en la que se han establecido prácticas y obras, se presentaron 9 eventos de escurrimiento.

Por otro lado, solamente en 5 eventos coincidió que en ambas microcuencas se presentara el escurrimiento, por lo tanto, en estos eventos se pueden comparar los datos para evaluar la respuesta hidrológica entre ambas microcuencas.

En los Cuadros 1 y 2, se presenta la información obtenida de cinco eventos de escurrimientos que se presentaron en el 2022 en cada una de las microcuencas, se incluye la información de precipitación del evento, precipitación de 5 días previos, volumen escurrido, lámina de escurrimiento, coeficiente de escurrimiento, escurrimiento máximo, escurrimiento medio y la intensidad media de la lluvia.

Cuadro 1. Información de la evaluación de la respuesta hidrológica en la microcuenca Ichupio (CON obras y prácticas de conservación) obtenidos en el 2022.

Fecha	Precipitación del evento (mm)	Precipitación de 5 días previos (mm)	Volumen escurrido (L)	Lámina de escurrimiento (mm)	Coficiente de escurrimiento	Escurrimiento máximo (L/s)	Escurrimiento medio (L/s)	Intensidad media de la lluvia (mm/h)
24-jul-22	12.6	44.0	290,668.75	0.285	0.0226	156.44	48.93	23.10
30-jul-22	5.4	23.2	154,832.47	0.152	0.0281	81.55	25.30	11.82
11-ago-22	22.2	19.4	123,557.56	0.121	0.0055	55.80	15.96	18.55
12-ago-22	7.6	42.0	26,380.21	0.026	0.0034	22.43	8.62	6.40
14-ago-22	11.6	64.0	101,210.32	0.099	0.0086	66.59	10.04	18.23
Total	59.4		696,649.31	0.683	0.0115			

Cuadro 2. Información de la evaluación de la respuesta hidrológica en la microcuenca Malacate (SIN obras y prácticas de conservación) obtenidos en el 2022.

Fecha	Precipitación (mm)	Precipitación de 5 días previos (mm)	Volumen escurrido (L)	Lámina de escurrimiento (mm)	Coficiente de escurrimiento	Escurrimiento máximo (L/s)	Escurrimiento medio (L/s)	Intensidad de la lluvia (mm/h)
24-jul-22	11.8	44.0	1,220,637.26	0.818	0.0693	332.58	80.50	23.23
30-jul-22	7.8	34.6	2,520,235.67	1.689	0.2165	531.96	129.64	5.11
11-ago-22	23.2	27.2	1,642,649.29	1.101	0.0474	295.33	97.08	13.96
12-ago-22	9.0	50.4	828,296.51	0.555	0.0617	271.29	57.03	8.29
14-ago-22	6.0	70.4	2,264,408.49	1.517	0.2529	207.73	56.71	22.78
Total	57.8		8,476,227.22	5.680	0.0983			

Un análisis general de la información de ambos Cuadros nos arrojó, que como era de esperar, en la microcuenca Malacate que es la que **NO TIENE obras ni prácticas**

conservacionistas, es la que presentó los mayores escurrimientos tanto en cantidad de *mm* como en los escurrimientos máximos registrados y, por tanto, lo mismo sucedió con el volumen total escurrido. Para realizar la evaluación e identificar el efecto que causan en la producción de escurrimientos las obras y prácticas conservacionistas, es necesario hacer un análisis conjunto de la información por evento que se presentó, y también analizarlo de manera global con los totales obtenidos.

La microcuenca Malacate fue la que presentó los mayores escurrimientos máximos, lo que derivó en presentarse un mayor caudal, aunado a que en su área de captación de la microcuenca no existen obras ni prácticas conservacionistas. En relación con la microcuenca Ichupio y debido a que tiene en su cuenca de captación las obras y prácticas conservacionistas, fue quien presentó menores tasas de escurrimiento. En cuanto a los escurrimientos superficiales, se obtuvo un coeficiente de escurrimiento de 0.0983 para los eventos de lluvia evaluados en la microcuenca Malacate, y de 0.0115 para la microcuenca Ichupio. Con ello entonces se determina que la eficiencia de las obras y prácticas conservacionistas establecidas en la cuenca fue de 87.98% para control de los escurrimientos.

En la Figura 5 se presentan los hidrogramas en pares de los 5 eventos analizados donde se puede discutir la respuesta hidrológica y el comportamiento del escurrimiento en cada microcuenca. Se observa en cada uno de los hidrogramas que el escurrimiento máximo que se presentó en la microcuenca Malacate fue casi de 200% y hasta 400% mayor del que se registró en la microcuenca Ichupio. Otra característica importante es el tiempo en el cual inició el escurrimiento en ambas microcuencas, ya que hubo un “retraso” de 30 a 40 minutos para que iniciara el caudal en la microcuenca Ichupio comparado con el tiempo de inicio del escurrimiento en la microcuenca Malacate.

Por otro lado, se observó, que al terminar el escurrimiento en la microcuenca Ichupio, en la microcuenca Malacate éste continuaba, y se llegó a registrar un tiempo de dos a tres horas en que seguía registrando el escurrimiento. La respuesta del escurrimiento dependió de condiciones de la lluvia como fue: la cantidad, el tiempo, la intensidad y la cantidad de lluvia de los cinco días previos, que en suma influyeron para que se presentara un escurrimiento mayor en cantidad y en tiempo.

Lo anterior nos demuestra la razón del que se presente una diferente respuesta hidrológica entre ambas microcuencas, y ello tiene la explicación en que, en la microcuenca Ichupio existen alrededor de 70 presas de diferente tipo (gaviones, piedra y geocostal) que propician a que por una parte, se retenga y se retrase el movimiento del agua por los cauces, y por otra parte a que se infiltre el agua retenida y, es por ello que el escurrimiento tarda más en llegar a la salida de la microcuenca, y por lo tanto, también provoca que termine antes el escurrimiento.

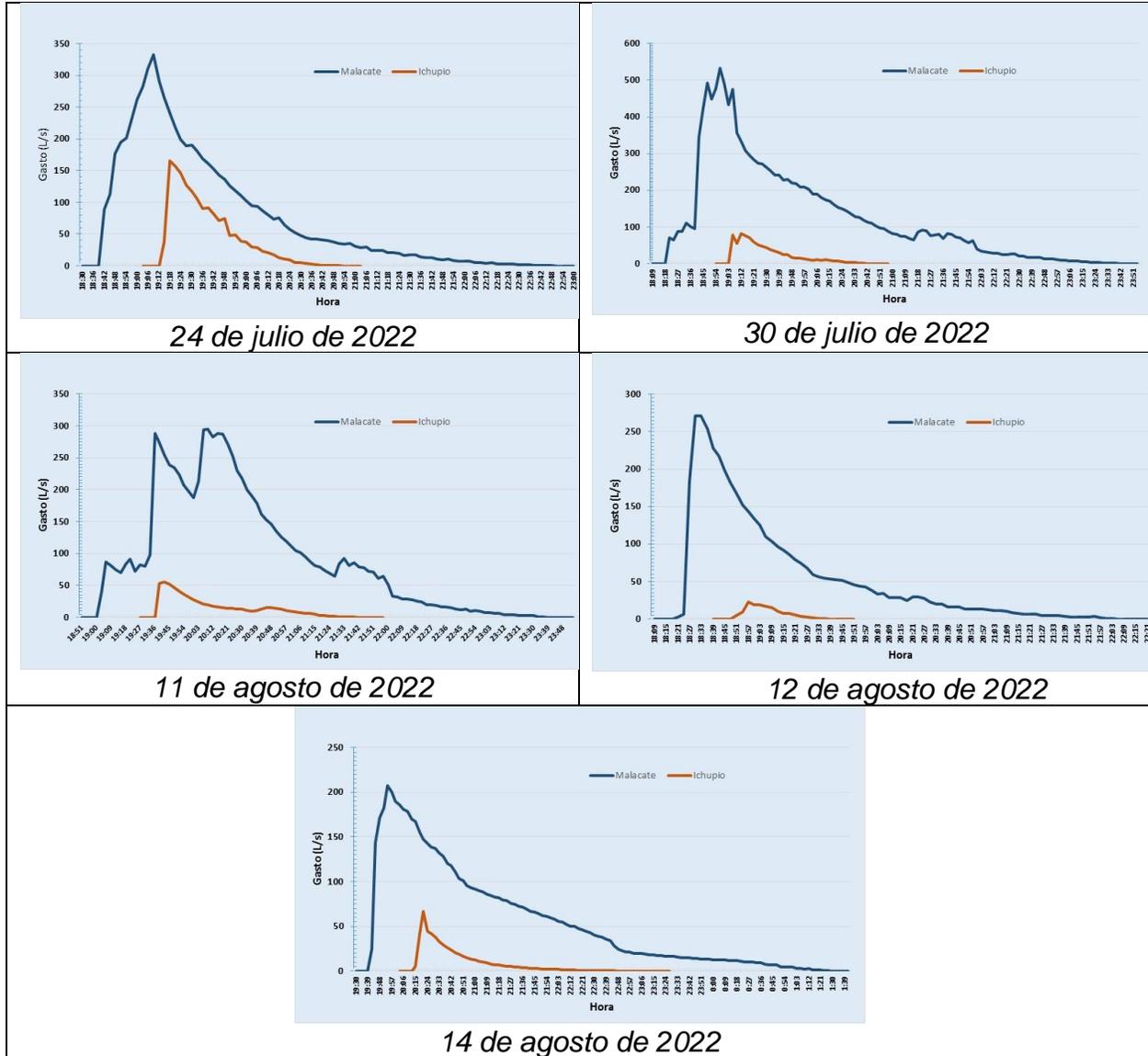


Figura 5. Hidrogramas en pares de eventos de escurrimiento presentados en las microcuencas Ichupio y Malacate durante el año 2022.

Los resultados de la presente investigación ayudan a sustentar las bases para comprender la relación lluvia-escurrimiento de las microcuencas forestales de la cuenca del Lago de Pátzcuaro.

Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos, se concluye que las obras y prácticas conservacionistas que se tienen establecidas en la microcuenca Ichupio influyen en su respuesta hidrológica al favorecer la retención y disminuir la velocidad del movimiento de los escurrimientos, ya que se registró a la salida de la microcuenca que éste iniciaba después de 30 a 40 minutos comparado con el tiempo de inicio del escurrimiento de la

microcuenca Malacate. Por otro lado, también se observó una mayor retención del agua e infiltración, porque en la microcuenca Ichupio terminaba el escurrimiento superficial de dos a tres horas antes comparado con el tiempo en que finaliza en la microcuenca Malacate. En la microcuenca Ichupio se registraron los menores volúmenes escurridos, láminas de escurrimiento, escurrimientos máximos y medios, comparados con los presentados en la microcuenca Malacate. Al realizar un análisis global para determinar la eficiencia para el control de los escurrimientos superficiales, se determinó que es del 87.98% y se debe primordialmente por las obras y prácticas conservacionistas establecidas en la microcuenca Ichupio, y por tanto se concluye que la mayor cantidad de lluvia que precipita en la microcuenca se aprovecha como infiltración, humedad del suelo, recarga de acuífero, etc.

Referencias Bibliográficas

- Beck, H.E., Bruijnzeel, L.A., van Dijk, A.I.J.M., McVicar, T.R., Scatena, F.N., Schellekens, J., 2013. The impact of forest regeneration on streamflow in 12 mesoscale humid tropical catchments. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 17, 2613–2635.
- 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. *J. Hydrol.* 310 (1–4), 28–61.
- Lacombe, G., Ribolzi, O., Rouw, A.D., Pierret, A., Latsachak, K., Silvera, N., Dinh, R.P., Orange, D., Janeau, J., Souleuth, B., Robain, H., Taccon, A., Sengphaathith, P., Mouche, E., Sengtaheuanghoung, O., Duc, T.T., Valentin, C., 2016. Contradictory hydrological impacts of afforestation in the humid tropics evidenced by longterm field monitoring and simulation modelling. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 20 (7), 2691–2704.
- Stednick, J.D., 1996. Monitoring the effects of timber harvest on annual water yield. *J. Hydrol.* 176 (1–4), 79–95.
- Van Dijk, A.I.J.M., Peña-Arancibia, J.L., Bruijnzeel, L.A., 2012. Land cover and water yield: inference problems when comparing catchments with mixed land cover. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 16 (9), 3461–3473.
- Vose, J.M., Sun, G., Ford, C.R., Bredemeier, M., Otsuki, K., Wei, X., Zhang, Z., Zhang, L., 2011. Forest ecohydrological research in the 21st century: what are the critical needs? *Ecohydrology* 4 (2), 146–158.
- Wei, X., Zhang, M., 2010. Quantifying streamflow change caused by forest disturbance at a large spatial scale: a single watershed study. *Water Resour. Res.* 46 (12), W12525.

- 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. *Hydro. Process.* <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.10107>.
- Zhang, X.K., Fan, J.H., Cheng, G.W., 2015. Modelling the effects of land-use change on runoff and sediment yield in the Weicheng River watershed, Southwest China. *J. Mount. Sci.* 12 (2), 434–445.
- Zhang, S., Yang, H., Yang, D., Jayawardena, A.W., 2016. Quantifying the effect of vegetation change on the regional water balance within the Budyko framework. *Geophys. Res. Lett.* 43 (3), 1019.