

EL PROCESO LLUVIA-ESCURRIMIENTO-EROSIÓN EN LADERAS Y MICROCUENCAS INSTRUMENTADAS

• Pedro Rivera-Ruiz •

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

• José Luis Oropeza-Mota • Mario Roberto Martínez-Menes •

• Enrique Mejía-Sáenz •

Colegio de Postgraduados, México

• Luis Mario Tapia-Vargas •

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, México

• Eusebio Jr. Ventura-Ramos •

Universidad Autónoma de Querétaro, México

Resumen

Se evaluó el proceso lluvia-escurrimiento-erosión en diferentes prácticas de manejo con cultivos de escarda y de cobertera en lotes de escurrimiento, así como también en una parcela con cultivo de maíz, establecidos en laderas de suelos andosoles de la cuenca Villa Victoria del Sistema Cutzamala durante 2007. Se presentaron 168 eventos de lluvia de los cuales sólo 14 generaron escurrimiento superficial y erosión del suelo. Los resultados mostraron que en pendientes de 30%, los cultivos de escarda en surcos al contorno tuvieron una eficiencia promedio del 40% para el control de los escurrimientos y la erosión del suelo; por otro lado, en los cultivos de cobertera, su eficiencia fue del 62%. En estos suelos, la erosión estuvo correlacionada con la lámina de escurrimiento, la precipitación efectiva, el escurrimiento máximo, la intensidad de la lluvia y la humedad antecedente. Por su parte, el escurrimiento superficial estuvo asociado con el escurrimiento máximo y la intensidad de la lluvia. Además, el escurrimiento máximo se correlacionó con la intensidad de la lluvia. En los meses de junio y julio se presentó el 37% del total de escurrimiento superficial, pero el 68% de la erosión del suelo, que es cuando se realizan labores culturales y la cobertura del cultivo, está entre el 45 y el 85%. Los requerimientos mínimos necesarios para que se presente el proceso lluvia-escurrimiento-erosión fueron láminas de lluvia de 4.2 mm, intensidad de lluvia de 8.69 mm/h y condición de humedad del suelo cerca de capacidad de campo (53% de humedad).

Palabras clave: lluvia, escurrimiento, erosión del suelo, intensidad de la lluvia, humedad del suelo, andosol, cuenca Villa Victoria.

Introducción

En un inicio, cuando el hombre pasó de ser nómada a sedentario, obtenía de las plantas sus alimentos para sobrevivir, de esta manera surgió la producción de cultivos o la agricultura. En aquellos tiempos se sembraba en terrenos profundos y ricos en materia orgánica, ubicados

en terrenos de valles y planicies, en los cuales se obtenían cosechas suficientes para atender las demandas de la población. Sin embargo, al paso de los años, la población se ha incrementado y con ello la demanda de alimentos; además, el ser humano se ha distribuido en diferentes lugares, donde ha conformado pueblos y comunidades, y para lograr subsistir ha “sacrificado” grandes

zonas de bosques, que se han integrado a la agricultura, incrementando con ello la frontera agrícola.

Esas áreas de bosque por lo general están ubicadas en lomeríos y montañas, y bajo el uso agrícola se han acelerado los procesos de erosión hídrica debido a la no integración de prácticas de manejo conservacionistas, por lo cual se ha afectando la productividad de los suelos y se han generando contaminantes que afectan la calidad de las aguas superficiales y subterráneas (Rivera *et al.*, 1997).

En el centro del país, en el eje neovolcánico, se encuentra un tipo de suelo dominante derivado de erupciones volcánicas, que se denomina suelo andosol o "polvillo". En el país está distribuido en 2 475 202.98 hectáreas (INEGI, 2000); tiene unas características especiales si se compara con otros suelos, como ser rico en materia orgánica, muy ácido, retener el fósforo por el alófono, muy suelto, muy permeable y frágil, y con alta capacidad de retención de agua, entre otras (Aguilar *et al.*, 2003).

Estas características contrastan con lo que se espera cómo reaccionen ante los procesos del escurrimiento superficial y del transporte de sólidos; se esperaría, por ejemplo, que no existieran elevadas tasas de erosión por la alta capacidad de retención de agua que presenta; sin embargo, se observa que las áreas productivas de estos suelos son productoras de sedimentos y contaminantes, como ocurre en las cuencas que integran el Sistema Cutzamala. Viramontes *et al.* (2008) encontraron que los andosoles son resistentes a la erosión cuando no son perturbados por la preparación del suelo, pero pueden llegar a ser muy frágiles en condiciones de degradación.

Las cuencas Villa Victoria y Valle de Bravo se ubican en el Estado de México, y en ellas se tienen las dos presas más importantes que integran el Sistema Cutzamala a través del cual se abastece de agua potable a la ciudad de México. En ambas cuencas, los suelos que predominan son los andosoles, y dentro de ellas se desarrollan actividades productivas

en parcelas de ladera sin un manejo conservacionistas que son generadoras de azolves y contaminantes que llegan finalmente a los embalses, afectando la calidad del agua, de tal manera que para hacer potable el agua es necesario realizar altas inversiones a través de sistemas de tratamiento que elevan los costos de potabilización.

En la cuenca Villa Victoria se han realizado estudios de eutroficación que han revelado el contenido de contaminantes (principalmente nitratos, fosfatos y azolves que han provocado una disminución en la calidad del agua), que provienen de la cuenca de captación de las parcelas de laderas productivas donde los agricultores aplican fertilizantes químicos y orgánicos, y no realizan un manejo del suelo que no propicie la erosión hídrica; por lo tanto, es necesario estudiar el comportamiento del escurrimiento y del transporte de los contaminantes y caracterizarlo, y al mismo tiempo evaluar la eficiencia de algunas estrategias de manejo que puedan promoverse entre los usuarios de las cuencas para prevenir y revertir la problemática.

En la presente investigación se caracterizaron los factores determinantes (y la interacción entre ellos) que intervienen en el proceso lluvia-escurrimiento-erosión de diversas prácticas de manejo en cultivos de ladera tanto a nivel de lotes de escurrimiento como de una pequeña microcuenca (parcela). Además, con la determinación de los parámetros hidrológicos que intervienen en el escurrimiento y en la pérdida de suelo, se podrán evaluar modelos numéricos de transferencia y realizar modelaciones de escenarios de las diferentes prácticas de manejo productivo-conservacionista para determinar escenarios de manejo sustentables, ya que como es sabido, para validar y calibrar los modelos hidrológicos se requiere de información confiable de campo.

Metodología

La presente investigación se llevó a cabo durante 2007 y se realizó en la microcuenca El Atole, que se localiza en la cuenca Villa Victoria

en el Estado de México, y tiene las siguientes coordenadas UTM de ubicación:

Norte	2 158 921
Sur	2 158 506
Este	382 772
Oeste	381 395

Cuenta con una superficie de 35.39 ha y su altitud oscila entre 2 700 y 2 820 msnm (figura 1).

El uso de suelo de la microcuenca es fundamentalmente agrícola con 14.86 ha (41.99%), forestal con 8.93 ha (25.23%), pecuario con 7.59 Ha (21.45%), plantación forestal con 0.74 ha (2.09%) y vivienda con 3.27 ha (9.24%).

En la figura 2 se muestra el uso de suelo de la microcuenca y la numeración de las parcelas que la conforman. Por su parte, en el cuadro 1 se presenta la distribución de superficie por uso de suelo.

Cuadro 1. Clasificación de uso de suelo de la microcuenca El Atole.

Uso de suelo	Superficie (ha)	%
Avena	1.70	4.81
Bosque	8.93	25.23
Lotes de escurrimiento	0.03	0.08
Maíz	12.47	35.24
Maleza	0.10	0.28
Papa	0.56	1.58
Pasto	7.59	21.45
Plantación forestal	0.74	2.09
Vivienda	3.27	9.24
Total	35.39	100.00

Se instalaron dos parcelas experimentales, la primera de ellas corresponde a la parcela número 40 de la figura 2. Se conformó por ocho lotes de escurrimiento de 2 x 10 m (20 m²), con una pendiente promedio de 32%, donde se

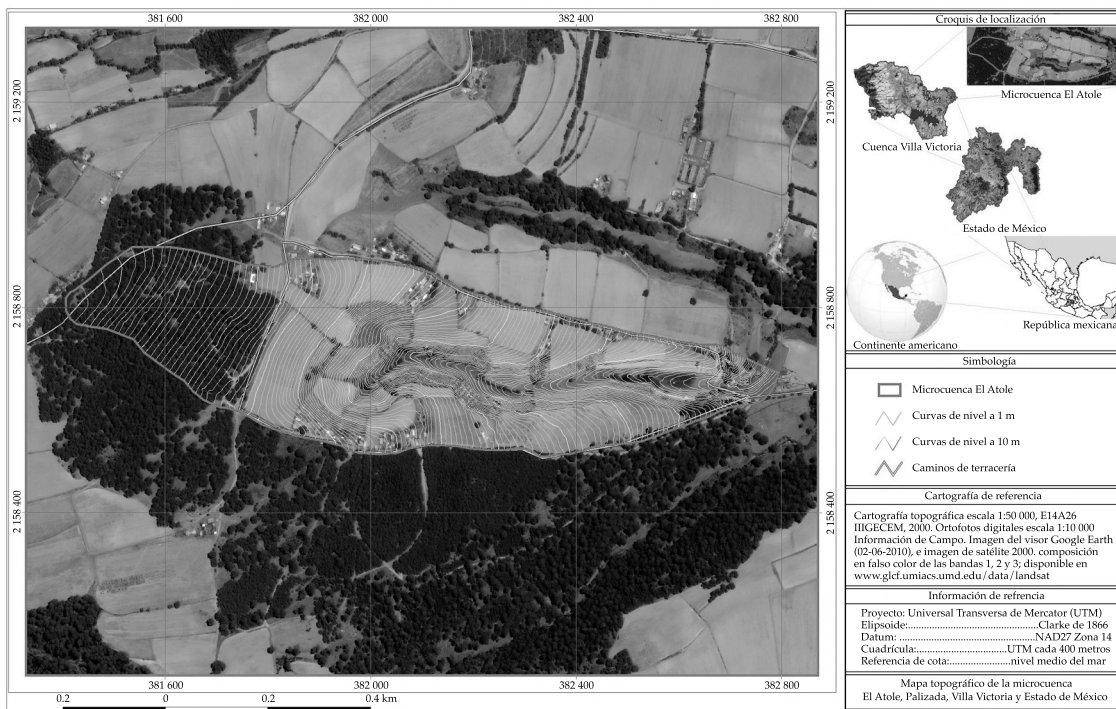


Figura 1. Localización y topografía de la microcuenca El Atole, municipio de Villa Victoria, Estado de México.

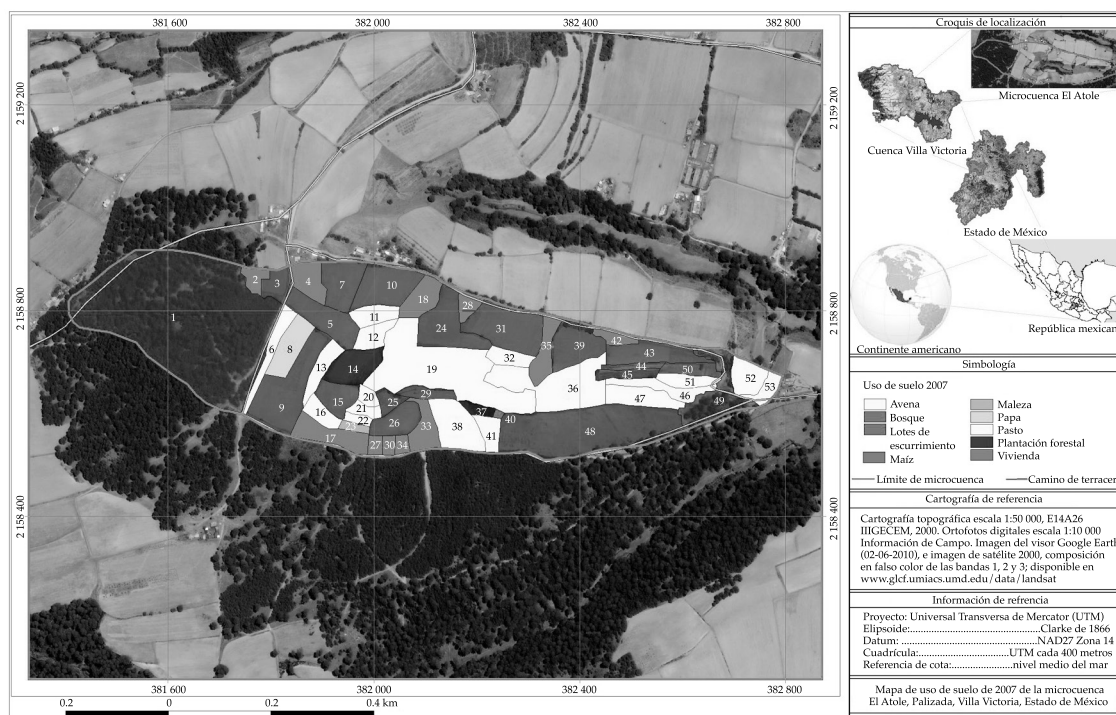


Figura 2. Uso de suelo y numeración de las parcelas de la microcuenca El Atole, municipio de Villa Victoria, Estado de México.

establecieron igual número de tratamientos, que fueron los siguientes: 1. SVN (suelo con vegetación nativa-pastizal y huacal); 2. FSC (frijol en surcos al contorno); 3. MSC (maíz en surcos al contorno); 4. HSC (haba en surcos al contorno); 5. SSV (suelo sin vegetación-desnudo); 6. AVE (avena); 7. PAS (pasto), y 8. PFN (plantación forestal con pino navideño).

Se captó el escurrimiento superficial en tanques de almacenamiento de 200 litros de capacidad y después de un evento se tomaba una muestra de escurrimiento de un litro para cuantificar los sedimentos.

La segunda parcela experimental, que corresponde a la parcela número 26 de la figura 2, tiene una superficie de 0.46 ha y una pendiente media de 15.4%; el cultivo que se estableció fue maíz en surcos al contorno. Para el registro de escurrimiento se colocó en la salida de la parcela un aforador con canal H con un sensor ultrasónico Enviranger ERS 500 de Siemens-Milltronics. En cada

evento de escurrimiento se “cazaban” las lluvias y se tomaron muestras de sedimentos cada cinco minutos para conformar el sedimentograma.

Como complemento se registró la humedad del suelo de manera diaria por la mañana y en la tarde, para lo que se utilizó el método gravimétrico. También se colocaron pluviómetros digitales para cuantificar la precipitación.

Resultados y discusión

Análisis de precipitación

Durante 2007 se presentó una precipitación total de 935.2 mm. En las figuras 3 y 4 se presenta la distribución diaria de la precipitación y distribución mensual con los días con lluvia.

Se observa que el periodo lluvioso fue de junio a octubre, en el cual se contabilizaron un total de 771.4 mm, que representó el 82% de la lluvia anual.

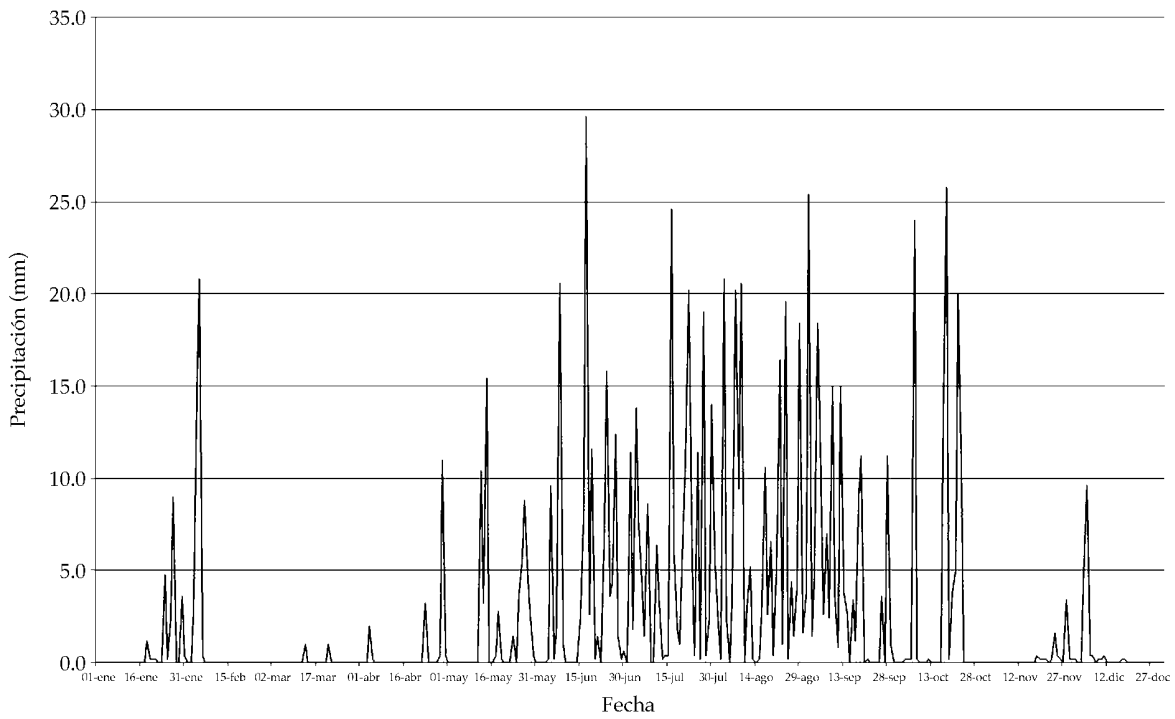


Figura 3. Distribución diaria de la precipitación en la microcuenca El Atole.

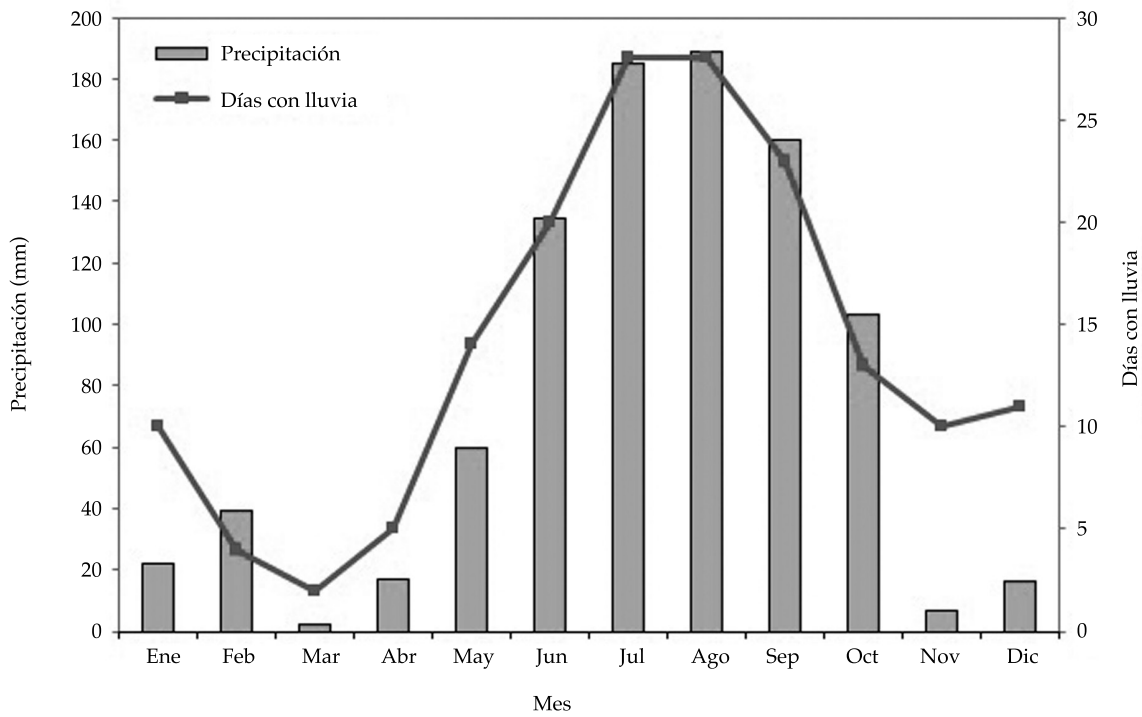


Figura 4. Distribución mensual de la precipitación y días con lluvia en la microcuenca El Atole.

Además, durante el año se presentó lluvia en 168 días, que equivale al 46% del total anual. Se observa que en los meses de julio y agosto prácticamente llovió todos los días. Durante el periodo de junio a octubre se contabilizaron 112 días con lluvia, que representan el 67% del total de días con lluvia al año.

Por otro lado, se realizó la distribución de los eventos de acuerdo con intervalos cada 5 mm. En la figura 5 se presenta la información de manera gráfica. Considerando la información anterior, se observa que el 66% de todos los eventos presentó precipitaciones menores a 5 mm al día. Veinte eventos tuvieron precipitaciones que superaron los 15 mm y, como se explica más adelante, dentro de éstos se tuvo el 65% de los eventos que generó escurrimiento superficial y erosión, aunque no fue la variable que se puede utilizar para pronosticar la presencia o no del proceso escurrimiento-erosión para la zona de estudio, sino que se complementa con otros factores, como la precipitación efectiva, lámina de escurrimiento, intensidad de la lluvia y condición de humedad antecedente en el perfil

del suelo, como se explica en los apartados siguientes.

Humedad del suelo

El contenido de humedad antecedente del suelo interviene de forma directa en el proceso de escurrimiento superficial, puesto que para eventos de precipitación de la misma intensidad, la respuesta del escurrimiento es variable para diferentes contenidos de humedad debido a la reducción en la capacidad de infiltración de los suelos conforme aumenta la humedad en el perfil del suelo (Cerdeña, 1993). Otros autores señalan que la importancia de la humedad antecedente en el escurrimiento generado depende de otros factores, como son las características de las precipitaciones o la textura del suelo (Malik et al., 1987).

Mediante muestras de suelo analizadas en laboratorio se determinó el contenido de humedad para el punto de marchites permanente (PMP) en 26% y la capacidad de campo (CC) en 54%.

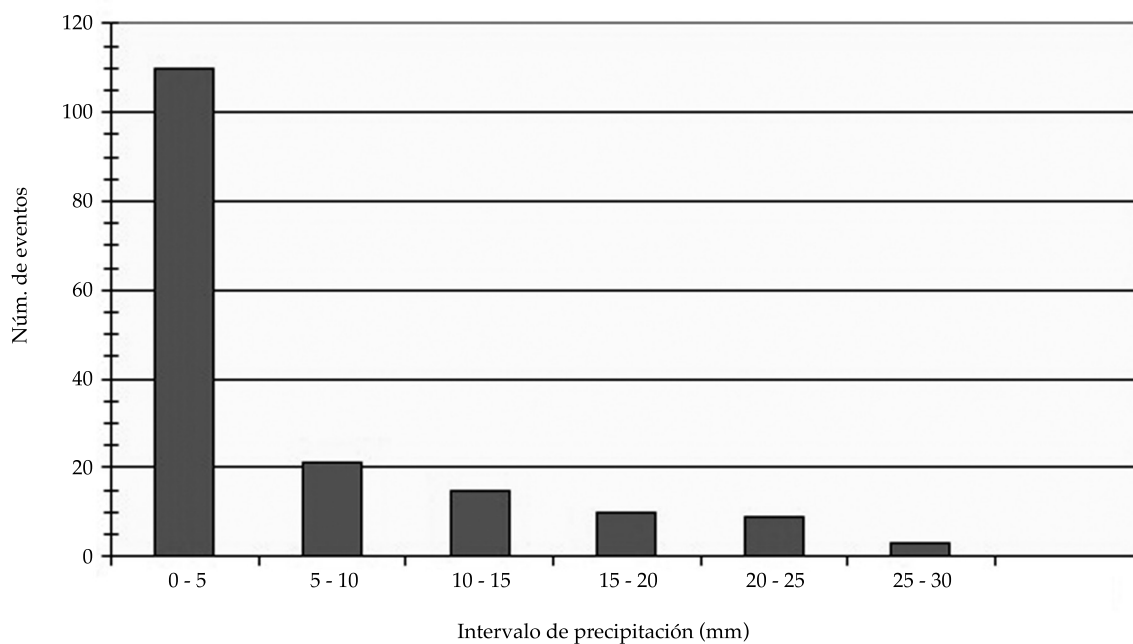


Figura 5. Número de eventos por intervalo de precipitación que se registraron en la microcuenca El Atole.

Los resultados obtenidos de contenido de humedad promedio en el suelo para el periodo de junio a diciembre se presentan en la figura 6.

Se observa que el contenido de humedad nunca estuvo por abajo del PMP en el periodo de lluvias de junio a octubre, es decir, que en este lapso, la planta nunca estuvo sometida a estrés hídrico. Se observa una ligera tendencia creciente del contenido de humedad a partir del mes de julio, que es cuando el suelo comienza a recuperarse del periodo seco. Sin embargo, también es notable cuando no hay presencia de lluvias, que el contenido de humedad disminuye con tendencia a llegar casi al PMP. Se observaron valores que oscilaron de 54.32 a 48.52%, tomados en la mañana y en la tarde, respectivamente. Lo anterior significa que en el transcurso del día se llega a perder aproximadamente el 5.80% de humedad por efecto de la evapotranspiración.

Las fluctuaciones en la gráfica muestran la frecuencia de presencia de lluvias y, por ende, las condiciones favorables de humedad antecedente para una respuesta en el escurrimiento superficial. Otro aspecto importante a considerar en la pérdida de

humedad del suelo es que el cultivo está en continuo crecimiento y desarrollo, por lo que también utiliza la humedad del suelo y existen más pérdidas por evapotranspiración.

En la gráfica se observa también que en este periodo el suelo se saturó en diferentes ocasiones, es decir, alcanzó contenidos de humedad superiores a capacidad de campo, y como se mencionó anteriormente, ésta es el agua que se mueve libremente en el perfil por acción de la gravedad, y la que se infiltra y finalmente recarga los acuíferos y manantiales.

Como se explicó anteriormente, en la grafica se observa cuando el suelo presentaba condiciones de humedad para la presencia de escurrimiento superficial, lo cual explica la presencia de escurrimiento a eventos de poca precipitación o poco escurrimiento a eventos de precipitación elevados.

Erosión de suelo y escurrimiento superficial

Durante el periodo de lluvias se registraron 14 eventos que generaron escurrimiento superficial, y la lámina de lluvia total que precipitó en estos eventos fue de 276.80 mm, por lo que

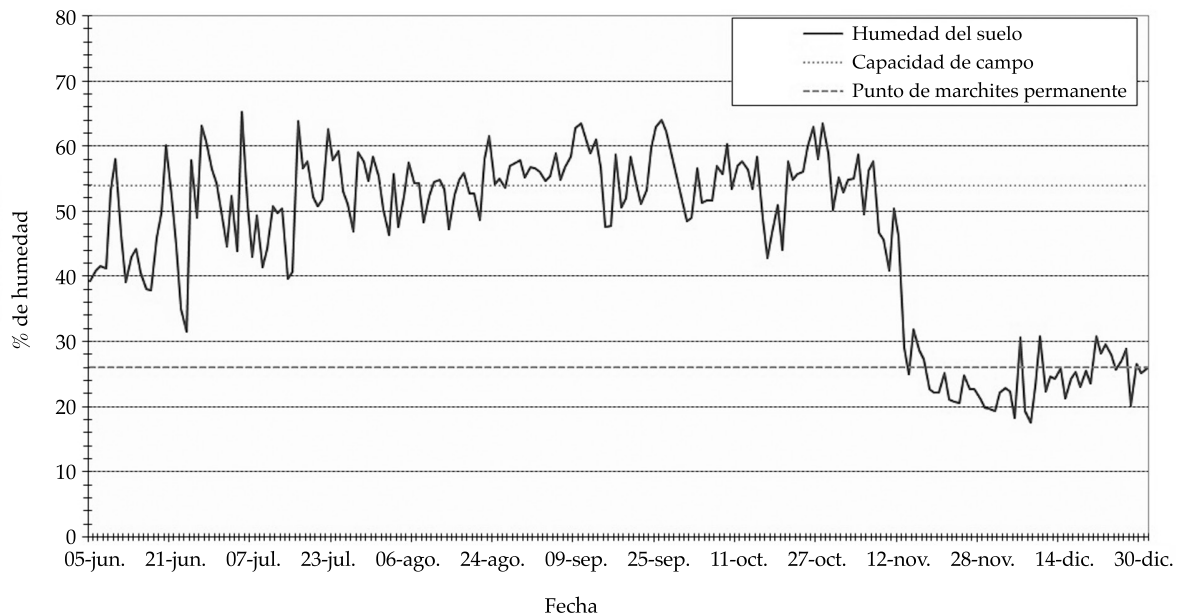


Figura 6. Contenido de humedad del suelo promedio diario en la microcuenca El Atole.

el 29.59% de la lluvia precipitada fue la que provocó escurrimiento superficial. En el cuadro 2 se presentan los resultados de escurrimiento y erosión hídrica que se obtuvieron para los ocho tratamientos evaluados en los lotes de escurrimiento.

El SSV fue el que presentó los valores más elevados tanto de escurrimiento superficial como de erosión hídrica, y a pesar de mantenerlo con un barbecho continuo y alta rugosidad del micro relieve de la capa superficial del suelo, es el tratamiento de manejo que más escurrimiento produce. Lo anterior se debe a que la intensidad de la precipitación fue mayor que las tasas de infiltración, y que el impacto de las gotas de lluvia provocó una compactación y un sellamiento de la superficie del suelo, lo cual coincide con lo reportado por Lindstrom *et al.* (1998). Tapia *et al.* (2004) indican que este proceso puede disminuir drásticamente la infiltración y aumentar los escurrimientos superficiales.

Los tratamientos que presentaron los escurrimientos superficiales más "altos" después del tratamiento de SSV fueron los cultivos que se siembran en surcos, como lo fue el MSC, FSC y HSC. El HSC presentó menos escurrimiento de los cultivos de escarda debido a que la planta se desarrolla en surcos altos que ayudan a la infiltración del agua. Estos resultados son atribuibles al cambio de la estructura

del suelo por el laboreo y a la rugosidad del terreno propiciado por la conformación de los residuos de cosecha que favorecen la infiltración del agua en el suelo, aumentan la capacidad de almacenamiento de agua, y modifican la dirección y velocidad del flujo superficial (Lawrence *et al.*, 1994; Hussain *et al.*, 1998; Tiscareño *et al.*, 1999). Posteriormente le siguieron los cultivos de PAS y AVE, ambos son cultivos de cobertera que protegen el suelo. Finalmente, SVN y PFN prácticamente no presentaron escurrimientos superficiales, porque cuantificaron valores bajos; cabe recordar que en estos tratamientos, el manejo que se realiza no considera el movimiento del suelo, y cuentan con vegetación y mantillo sobre la superficie del suelo que favorece la infiltración del agua en el perfil.

Considerando la precipitación total anual, se obtuvo un valor de coeficiente de escurrimiento de 4.92% para el suelo desnudo. Para los cultivos en surcos, los valores oscilaron de 2.0 a 3.0%. Los cultivos de cobertera presentaron valores de 1.0 a 2.0%. La vegetación nativa y la plantación forestal tuvieron los valores menores de coeficiente de escurrimiento con 0.09 y 0.03%, respectivamente.

En relación con la erosión hídrica, el comportamiento de los cultivos en surcos también fueron los que presentaron los valores más altos de erosión después del tratamiento de

Cuadro 2. Escurrimiento superficial y erosión hídrica en los tratamientos evaluados.

Tratamiento	Lámina de escurrimiento (mm)	Coefficiente de escurrimiento (%)	Coefficiente de escurrimiento en eventos (%)	Erosión hídrica (ton/ha)
SVN	0.87	0.09	0.32	0.09
FSC	28.91	3.09	10.45	3.34
MSC	27.41	2.93	9.90	2.97
HSC	24.19	2.59	8.74	3.14
SSV	46.05	4.92	16.64	5.12
AVE	10.82	1.16	3.91	1.39
PAS	20.03	2.14	7.24	2.97
PFN	0.27	0.03	0.10	0.07

suelo desnudo. Sin embargo, en los cultivos de cobertera como el pasto y la avena, sí se presentaron diferencias, porque el pasto anual presentó una tasa de erosión similar al del maíz en surcos al contorno y en la avena fue de tan sólo 1.39 ton/ha. La explicación de la diferencia observada se debe quizá a que el porte de la planta de pasto es muy pequeña comparada con la de la avena, y como se realizó movimiento de suelo para la siembra, se provocó una mayor erosión. Por otro lado, hay que mencionar que en el caso de la avena, al momento de sembrarse, se realizó en pequeños surcos que favorecieron la infiltración del agua y menor erosión, comparada con la del pasto anual. Mención aparte lo tuvieron la vegetación nativa y la plantación forestal con pino navideño, porque de todos los tratamientos fueron los que presentaron las menores pérdidas de suelo, con tan sólo 0.09 y 0.07 ton/ha, respectivamente.

La ocurrencia y magnitud de los eventos de las pérdidas de suelo en un lote dependen de la magnitud e intensidad del evento de precipitación, así como de las condiciones del suelo, el manejo y la etapa de desarrollo del cultivo en cada caso específico. Por esta razón, el número de los eventos con pérdidas del suelo es diferente de un lote a otro, y la variabilidad de las series de erosión dentro de cada tratamiento es atribuida a un efecto aditivo de la variabilidad entre los eventos de lluvia y de los escurrimientos en cada lote. La intensidad de un evento de precipitación y escurrimiento puede ser acentuada o suavizada dependiendo del manejo agronómico que se da a cada lote (Velásquez, 2006).

Con esta información se desprende que los cultivos sembrados en surcos presentan una eficiencia promedio del 40.0% en el control de escurrimientos y de erosión hídrica; los cultivos de cobertera tuvieron una eficiencia promedio de 61.9%; finalmente, la plantación forestal y la vegetación nativa fueron los más eficientes, con el 98.6%.

Con base en los fundamentos anteriores se pueden recomendar estas prácticas conser-

vacionistas para utilizarse en parcelas de ladera con pendientes superiores a 10%, porque queda demostrado que se puede producir conservando sin degradar los recursos agua-suelo.

A su vez, en la parcela número 26 se registró la precipitación efectiva, el escurrimiento máximo, el volumen escurrido y la erosión hídrica en 14 eventos que se presentaron en el ciclo de evaluación; dicha información se presenta en el cuadro 3.

La lluvia total que generó escurrimiento fue de 157.40 mm. Por su parte, la lámina total de escurrimiento fue de 35.67 mm, lo que significa que el coeficiente de escurrimiento para los eventos evaluados fue de 22.66%.

De manera general, al cuantificar el total de lámina escurrida durante el mes de agosto, éste representó el 66.71% de la lámina total de escurrimiento. Siguiendo el mismo orden, los eventos cuantificados durante el mes de junio representaron el 16.22% de la lámina total de escurrimiento, seguido por el mes de septiembre, y finalmente el mes de julio, con 12.82 y 4.26% del total, respectivamente.

En cuanto a las tasas de erosión, se observa que en el primer evento se tuvo la erosión más alta, con 0.829 ton/ha, que representa el 33.92% de la erosión total cuantificada. Cabe mencionar que en este primer evento no se tuvo el mayor gasto en el escurrimiento y tampoco el mayor volumen, lo cual se explica por las condiciones del terreno, que son las que favorecieron las tasas de erosión, ya que previo al evento se realizaron labores de cultivo, por lo que se realizó movimiento de suelo. Lo anterior se comprueba de acuerdo con Truman y Williams (2001), quienes mencionan que la producción de sedimentos por efecto de manejo puede variar estacionalmente debido a las alteraciones de la superficie del suelo por la maquinaria y la secuencia previa de las tormentas.

Otro evento importante es el del 3 de agosto, ya que la erosión en este evento representó el 21.72% del total. En este caso, la erosión estuvo más asociada con la cantidad e intensidad de la lluvia, ya que en este evento se observa

Cuadro 3. Gasto máximo, volumen escurrido y erosión para cada evento de escurrimiento en la parcela núm. 26.

Fecha	Precipitación diaria (mm)	Precipitación efectiva (mm)	Intensidad de lluvia (mm/h)	Precipitación acumulada de cinco días previos (mm)	Humedad antecedente de cinco días previos (%)	Escorrentía máxima (L/s)	Lámina de escurrimiento (mm)	Coefficiente de escurrimiento (%)	Erosión (ton/ha)
17-jun	29.6	26.4	42.21	10.60	41.46	18.60	5.78	21.89	0.829
08-jul	8.6	7.4	12.69	28.80	50.75	0.17	0.02	0.27	0.015
21-jul	10.8	10.4	7.17	40.60	54.29	1.23	0.24	2.31	0.051
22-jul	20.2	10.6	12.47	51.40	53.10	2.45	0.11	1.04	0.028
27-jul	19.0	12.4	17.71	37.80	55.31	11.13	1.14	9.19	0.221
03-ago	20.8	13.8	19.26	24.00	54.68	19.63	6.05	43.84	0.531
07-ago	20.2	6.8	9.71	27.00	50.51	0.40	0.08	1.18	0.003
09-ago	20.6	18.6	14.49	35.60	45.62	35.60	9.66	51.94	0.409
12-ago	5.2	4.2	8.69	53.20	52.34	1.71	0.11	2.62	0.003
24-ago	19.6	12.8	17.45	29.60	57.81	20.17	4.37	34.14	0.077
29-ago	18.4	9.0	20.00	29.80	54.15	23.10	3.41	37.89	0.045
31-ago	3.8	2.4	12.00	30.00	58.15	1.71	0.12	5.00	0.004
04-sep	18.4	15.4	8.97	46.40	54.26	1.88	0.35	2.27	0.008
19-sep	11.2	7.2	24.00	20.00	51.15	18.01	4.23	58.75	0.220
Media	16.17	11.24	16.20	33.20	52.40	11.13	2.55	19.45	0.17
Error típico	1.92	1.65	2.40	3.19	1.20	3.03	0.82	5.73	0.07
Mediana	18.70	10.50	13.59	29.90	53.63	6.79	0.75	7.10	0.05
Desviación estándar	7.17	6.18	8.96	11.93	4.47	11.34	3.07	21.45	0.25
Varianza de la muestra	51.37	38.17	80.32	142.26	20.01	128.52	9.43	460.28	0.06
Curtosis	-0.28	1.66	5.20	-0.19	1.83	-0.41	0.39	-1.13	2.57
Rango	25.80	24.00	35.04	42.60	16.69	35.43	9.64	58.48	0.83
Mínimo	3.80	2.40	7.17	10.60	41.46	0.17	0.02	0.27	0.00
Máximo	29.60	26.40	42.21	53.20	58.15	35.60	9.66	58.75	0.83
Suma	226.40	157.40	226.82	464.80	733.58	155.79	35.67	272.33	2.44

una precipitación efectiva de considerable importancia y alcanzó un gasto alto en el escurrimiento. En este orden de importancia, el otro evento que mereció atención es el que se presentó el 9 de agosto, ya que el suelo perdido representó el 16.72% del total erosionado y este caso, al igual que el evento anterior, está asociado con la cantidad e intensidad de la precipitación. Posterior a dicha fecha se tienen otros eventos importantes en cuanto al volumen de escurrimiento y lámina efectiva de precipitación; sin embargo la erosión se presenta en menor cantidad, puesto que para esas fechas el cultivo ha alcanzado su máximo desarrollo vegetativo y es cuando se tiene una mayor cubierta vegetal y es que ello influye directamente en el desprendimiento de las partículas de suelo por impacto de las gotas de lluvia. Se registró una erosión total para los 14 eventos de 2.444 ton/ha.

De acuerdo con análisis de muestras de suelo, se determinó que la parcela tiene en su perfil una textura que va de franco a franco limoso, y de acuerdo con Rawls *et al.* (1982, 1983) y Wanielista (1990), su tasa básica de infiltración es de 6.86 a 13.21 mm/h y entran dentro del grupo hidrológico C, que corresponde a suelos con moderadamente alto potencial de escurrimiento y comprende suelos someros como los de la microcuenca en estudio. Así era de esperar que en intensidades de lluvia de apenas 7.0 mm/h se presentara escurrimiento superficial, como fue el caso del evento del 21 de julio, y es que el escurrimiento superficial se inicia una vez que el perfil del suelo se ha saturado de agua y se supera la tasa de infiltración, porque entonces el agua empieza a moverse en el sentido de la pendiente dominante (Woolhiser *et al.*, 1990). En los demás eventos se superó las intensidades de lluvia, por lo que significó mayores láminas de escurrimiento y escurrimientos máximos, así como mayor erosión.

Sin embargo, para que se presente el proceso lluvia-escurrimiento-erosión hay dos aspectos importantes por considerar: la precipitación acumulada y la humedad

anterior en el suelo en los cinco días previos al evento (Soil Conservation Service, 1985; Mishra *et al.*, 2006; Garen y Moore, 2005), ya que con ello se determina la probabilidad de que se genere escurrimiento. De acuerdo con los autores, cuando previamente se llegan a tener menos de 12.7 mm de lluvia, entonces la condición de humedad del suelo es seca; si se tiene entre 12.7 y 38.1 mm, entonces la condición de humedad es media, y finalmente, si precipitan más de 38.1 mm, entonces la condición de humedad del suelo es húmeda. Con base en ello se tiene que solamente un evento se presentó en condición seca, pero hubo mucha erosión, porque la intensidad de la lluvia fue la mayor de todos los eventos, al igual que la precipitación efectiva. Se presentaron nueve eventos cuando la condición de humedad era media, con valores que llegaron casi a la condición húmeda, con valores de humedad anterior promedio que oscilaron en 53%. Cabe recordar que el contenido de humedad a capacidad de campo para este tipo de suelo es de 54%. Se tuvieron cuatro eventos en condiciones húmedas y el promedio de humedad en el suelo promedio osciló por el 53.50%.

Así, es claro que para este tipo de suelos las condiciones para que se presente el proceso lluvia-escurrimiento-erosión son el tener una condición de humedad del suelo cercana a la capacidad de campo, con lluvias efectivas promedio de 7.0 a 14.0 mm de lámina, e intensidades promedio de 12.0 a 20.0 mm/h.

Proceso lluvia-escurrimiento-erosión

El análisis del proceso lluvia-escurrimiento-erosión se realizó considerando la información de los eventos de lluvia que se registraron, de tal manera que se determinaron los coeficientes de correlación (R^2) entre la erosión con diversas variables de precipitación y escurrimiento. Con base en ello se puede concluir que para la zona de estudio y este tipo de suelos, la erosión del suelo está más correlacionada con la lámina

de escorrentía seguida de la precipitación efectiva, el escorrentía máxima, la intensidad de la lluvia y la humedad antecedente. En el caso de la lámina de escorrentía, se observó una mejor correlación con el escorrentía máximo, seguida de la intensidad de la lluvia, así como con la precipitación acumulada en los cinco días previos. En cuanto al escorrentía máximo, éste tuvo una buena correlación con la intensidad de la lluvia. Lo anterior demuestra que existe una gran dispersión de los valores obtenidos en el análisis del proceso lluvia-escorrentía-erosión (figura 7).

Al igual que Viramontes *et al.* (2008), no fue posible encontrar un modelo de regresión múltiple con resultados estadísticamente significativos y es claro que se debe a la gran variabilidad de los datos observados, aun-

que quizá se pueden encontrar mejores correlaciones al analizar eventos de otros años de estudio.

Sin embargo, analizando el límite de precipitación efectiva relacionada con la intensidad de la lluvia, se observa que pueden tenerse láminas de lluvia de 4.2 mm e intensidades de 8.69 mm/h, y se genera escorrentía y erosión, pero fue fundamental la humedad antecedente en el suelo y la precipitación acumulada en los cinco días previos, como sucedió en el evento del 12 de agosto.

Para todos los eventos se tuvo el comportamiento del tipo Horton, porque el escorrentía se presentó una vez que se superó la velocidad de escorrentía del perfil del suelo.

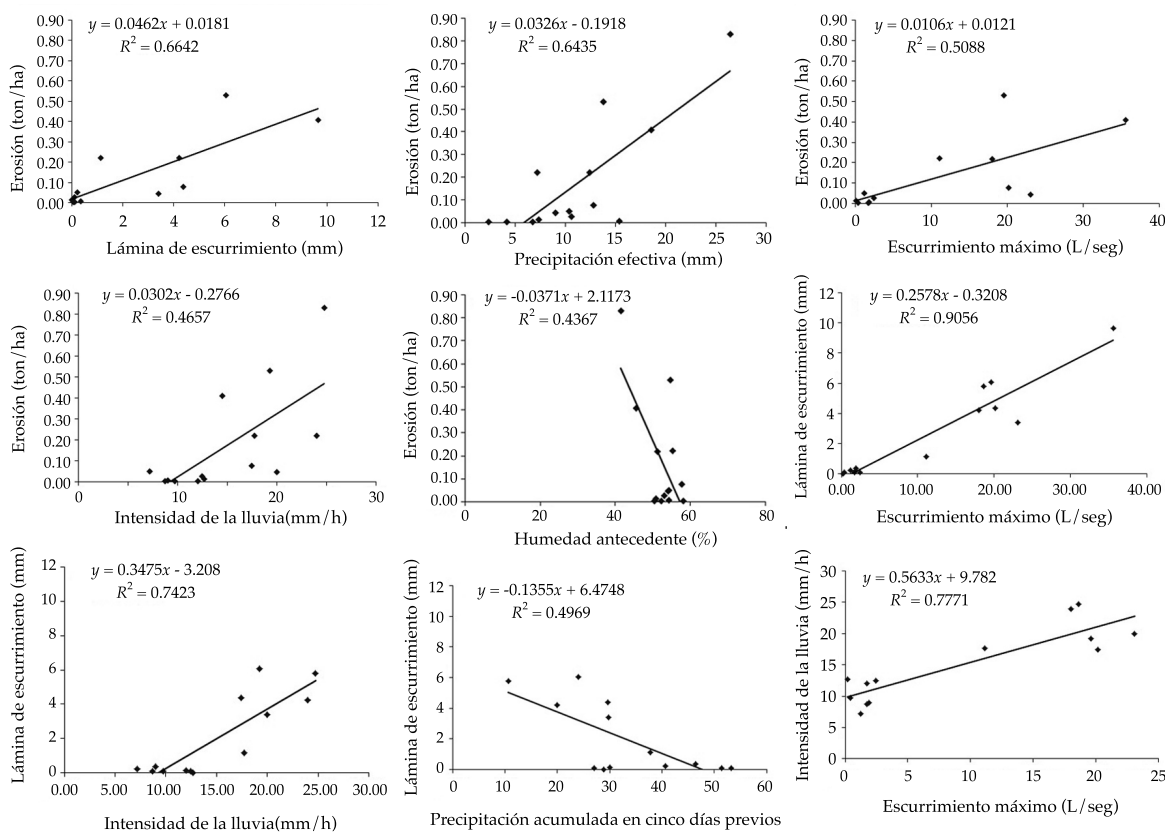


Figura 7. Análisis de correlación entre la erosión, el escorrentía y la precipitación con las diversas variables que mejor respuesta tuvieron en el estudio.

Se considera que los primeros eventos son los más importantes para este tipo de suelos debido al manejo acostumbrado que se realiza, ya que en el mes de junio se dan dos “escardas”, por lo que hay movimiento de suelo que puede ser erosionado, aunado a que la cobertura del cultivo de maíz es de casi el 45%, y para el mes de julio la cobertura en promedio es del 85%. Para el año de estudio, en los primeros cinco eventos se presentó el 37.40% de los escurrimientos superficiales y el 68.55% de la erosión hídrica, lo anterior también fue observado por Viramontes *et al.* (2008).

En cuanto a la relación lluvia-escurrimiento, la mejor correlación que se obtuvo fue al relacionar la lámina de escurrimiento con la intensidad de la lluvia, lo cual coincide con lo reportado por Francisco (2005) y Medard (1994), quienes mencionan que la relación directa entre la precipitación y el escurrimiento es difícil de explicar si no se establece que la información analizada es por evento de precipitación, que se conoce sólo la cantidad de lluvia precipitada y no la duración, que no se toman en cuenta los contenidos de humedad del suelo al momento del evento, y que no se consideran los cambios en la cobertura del suelo, que es definida como la condición hidrológica de los suelos, aspectos que son importantes para definir la relación de precipitación-escurrimiento en cualquier sitio. Para este estudio se consideraron estos aspectos, aunque finalmente se concluye que los suelos andosoles son especiales en relación con su respuesta hidrológica, y se requiere de una investigación permanente para explicar mejor los procesos de escurrimiento y erosión.

Conclusiones

En la zona de estudio se tiene una presencia importante de días con lluvia porque prácticamente el 46% del año (168 días) tuvo al menos un evento de precipitación; sin embargo, solamente veinte eventos presentaron más de 15 mm de lluvia al día y dentro de estos estuvieron los que ocasionaron escurrimiento superficial y pérdida de suelo.

Los cultivos de escarda sembrados en surcos al contorno impactan en la reducción del escurrimiento superficial y en la pérdida de suelo con una eficiencia promedio del 40.0%; por su parte, en los cultivos de cobertera, como el pasto y la avena, su eficiencia promedio fue de 62.0%, esto indica que al utilizar cultivos de escarda en laderas se requiere de complementar con otra práctica de manejo, como las terrazas, debido a que se trata de pendientes superiores a 30%. Las diferencias observadas en la producción de sedimentos entre los cultivos de escarda y los de cobertera se debieron a que en los primeros se realiza movimiento de suelo después de la siembra, haciéndolos más frágiles a la erosión.

Los suelos andosoles tienen una alta capacidad de infiltración del agua de lluvia cuando están en condición seca del perfil del suelo y por tanto es difícil que se puedan generar muchos eventos de escurrimiento; sin embargo, una vez que se tienen condiciones de humedad cercana a capacidad de campo, se satura el suelo rápidamente a intensidades de lluvia superiores de al menos 8.0 mm/h y es entonces cuando se presenta movimiento del agua sobre la superficie, arrastrando las partículas del suelo, provocando la erosión. Se comprueba que los 14 eventos cuantificados fueron suficientes como para generar tasas de erosión importantes. Por otro lado, se concluye que los primeros eventos de escurrimiento que se presentan en los meses de junio y julio son capaces de producir hasta el 37% del total de los escurrimientos y el 68% de la erosión del suelo.

Para los suelos andosoles y los tipos de lluvia que se presentan en la zona de estudio, la erosión del suelo estuvo correlacionada al proceso lluvia-escurrimiento, principalmente con las variables lámina de escurrimiento, precipitación efectiva, escurrimiento máximo e intensidad de la lluvia; sin embargo, se esperaba una mejor correlación con el contenido de humedad antecedente, pero no fue así; empero, analizando de manera puntual cada evento, se identificó que en todos los casos y para cada

uno de los eventos de escurrimiento superficial que se presentó se tuvieron humedades del suelo cercanas a capacidad de campo. A su vez, el escurrimiento superficial se correlacionó de manera satisfactoria con la intensidad de la lluvia y el escurrimiento máximo. No fue posible encontrar modelos de regresión múltiples con resultados estadísticamente significativos, lo que puede solventarse con información generada en más años de estudio, que expliquen mejor las correlaciones que puedan existir en el proceso lluvia-escurrimiento-erosión en este tipo de suelos.

Recibido: 27/08/09

Aceptado: 10/04/12

Referencias

- AGUILAR, A.J.L., LÓPEZ, M.R., NÚÑEZ, E. R y KHALIL, G.A. Encalado y fertilización fosfatada en el cultivo de papa en un andosol de la Sierra Veracruzana. *Revista Terra*. Vol. 21, núm. 3, 2003, pp. 417-426.
- CERDA, A. *La Infiltración de los Suelos del País Valenciano. Factores y Variaciones Espacio-Temporales*. Tesis doctoral. Valencia: Universidad de Valencia, 1993, 357 pp.
- FRANCISCO, N.N. *Productividad y erosión hídrica en tres sistemas de manejo del cultivo doble de maíz en una ladera del trópico subhúmedo de México*. Tesis de doctorado. Montecillo, México: Colegio de Postgraduados, 2005, 122 pp.
- GAREN, D.C. and MOORE, D.S. Curve number hydrology in water quality modeling: Uses, abuses, and future directions. *Journal American Water Resources Association*. Vol. 41, No. 2, 2005, pp. 377-388.
- HUSSAIN, I., OLSON, K.R., and SIEMENS, J.C. Long-term tillage effects on physical properties of eroded soil. *Soil Science*. Vol. 163, No. 12, 1998, pp. 970-981.
- INEGI. *Mapa digital de uso de suelo de la República Mexicana. Escala 1:1,000,000*. Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2000.
- LAWRENCE, P.A., RADFORD, B.J., THOMAS, G.A., SINCLAIR, D.P., and KEY, A.J. Effect of tillage practices on wheat performance in a semi-arid environment. *Soil and Tillage Research*. Vol. 28, No. 3-4, 1994, pp. 347-364.
- LINDSTROM, M.J., SCHUMACHER, T.E., COGO, N.P., and BLECHA, M.L. Tillage: Tillage effects on water runoff and soil erosion after sod. *Journal of Soil and Water Conservation*. Vol. 53, No. 1, 1998, pp. 59-63.
- MALIK, R.S., BUTTER, B.S., ANLAUF, R., and RICHTER, J. Water penetration into soils with different textures and initial moisture contents. *Soil Science*. Vol. 144, No. 6, 1987, pp. 389-393.
- MEDARD, A.J. *Evaluación de la producción de sedimentos y del escurrimiento superficial en pequeñas cuencas agrícolas*. Tesis de maestría. Montecillo, México: Colegio de Postgraduados, 1994, 135 pp.
- MISHRA, S.K., SAHU, R.K., EL DHO, T.I., and JAIN, M.K. An improved Ia-S relation incorporating antecedent moisture in SCS-CN methodology. *Water Resources Management*. Vol. 20, No. 5, 2006, pp. 643-660.
- RAWLS, W.J., BRAKENSIEK, D.L., and SAXTON, K.E. Estimation of soil properties. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*. Vol. 25, No. 5, 1982, pp. 1316-1320.
- RAWLS, W.J., BRAKENSIEK, D.L., and SONY, B. Agricultural management of soil water properties, part I: soil water retention and Grenn-Ampt infiltration parameters. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*. Vol. 26, No. 6, 1983, pp. 1752-1753.
- RIVERA, R.P., MEDINA, M.R. WRUCK, S.W. y GÓMEZ, G.A. *Estudio de erosión hídrica actual de la cuenca Villa Victoria, Estado de México*. Memoria Técnica. Jiutepec, México: Comisión Nacional del Agua, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 1997, 21 pp.
- SOIL CONSERVATION SERVICE. Estimation of direct runoff from storm rainfall. Ch. 10. *In Hydrology National Engineering Handbook. Suppl. A, Sect. 4*. Washington, D.C.: USDA-SCS, 1985.
- TAPIA, V.L.M., TISCAREÑO, L.M., VELÁZQUEZ, V.M., ROCHA, A.J.L. y OROPEZA, M.J.L. *Modelación de la erosión y escurrimiento en suelos de ladera en la cuenca del Lago de Pátzcuaro*. Publicación Técnica núm. 3. Morelia, México: INIFAP-CENAPROS, 2004, 44 pp.
- TISCAREÑO, L.M., BÁEZ, G.A.D., VELÁZQUEZ, V.M., POTTER, K.N., STONE, J.J., TAPIA V.L. M., and CLAVERÁN, A.R. Agricultural research for watershed restoration in central México. *Journal of Soil and Water Conservation*. Vol. 54, No. 4, 1999, pp. 686-692.
- TRUMAN, C.C. and WILLIAMS, R.G. Effects of peanut cropping practices and canopy cover conditions on runoff and sediment yield. *Journal of Soil and Water Conservation*. Vol. 56, No. 2, 2001, pp. 152-159.
- VELÁSQUEZ, V.M.A. *Análisis fractal de la rugosidad de un andosol como indicador de su erosionabilidad*. Tesis doctoral. Programa de Hidrociencias. Montecillo, México: Colegio de Postgraduados, 2006, 177 pp.
- VIRAMONTES, D., ESTEVES, M., DESCROIX, L., DUWING, C., ROJAS ROJAS, F., GUTIERREZ, A. y DE LEÓN MOJARRO, B. Cuantificación del escurrimiento y erosión hídrica en andosoles de una microcuenca experimental en Valle de Bravo. *Ingeniería hidráulica en*

México. Vol. XXIII, núm. 3, julio-septiembre de 2008, pp. 89-103.

WANIELISTA, M.P. Hydrology and water models with special reference to the phosphorus loading concept in limnology. *Schweiz. Z. Hydrol.* Vol. 37, 1990, pp. 53-83.

WOOLHISER, D.A., SMITH, R.E., and GOODRICH, D.C. *Kineros: A kinematic runoff and erosion model: Documentation and User's Manual*. Beltsville, USA: Department of Agriculture, Agricultural Research Service, ARS, 1990, 130 pp.

Abstract

RIVERA-RUIZ, P., OROPEZA-MOTA, J.L., MARTÍNEZ-MENES, M.R., MEJÍA-SÁENZ, E., TAPIA-VARGAS, L.M. & VENTURA-RAMOS, E.Jr. The rainfall-runoff-erosion relationship in hillsides and microwatersheds. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*. Vol. III, No. 4, October-December, 2012, pp. 151-166.

The rainfall-runoff-erosion process was evaluated for runoff plots with different management practices for row and cover crops, as well as for a hillside parcel with corn crops in andosol soil. The study was carried out in 2007 in the Villa Victoria watershed, in the Mexico Cutzamala System. During the study period, 168 rainy events were registered, only 14 of which generated surface runoff and soil erosion. The results showed that in land with a 30 percent slope, the average efficiency of runoff and soil erosion control was 40% for row crops in contour strips and 62% for cover crops. In these soils, erosion was highly correlated with runoff, effective rainfall, peak runoff, rainfall intensity and antecedent soil moisture; surface flow (runoff) was related with peak runoff and rainfall intensity, and; peak flow was highly correlated with rainfall intensity. Though 37% of the total runoff occurred in June and July, total soil loss from erosion was 68%. It is during this period that the land is worked and the crop canopy coverage is between 45 to 85%. The minimum requirements for the rainfall-runoff-soil erosion process to occur were rainfall depth of 4.2 mm, rainfall intensity of 8.69 mm/h and an antecedent soil moisture near field capacity (around 53% humidity).

Keywords: rainfall, runoff, soil erosion, rainfall intensity, soil moisture, andosol, Villa Victoria watershed.

Dirección institucional de los autores

M.C. Pedro Rivera Ruiz

Coordinación de Riego y Drenaje
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Paseo Cuauhnáhuac 8532, Colonia Progreso
62550 Jiutepec, Morelos, México
Teléfono: +52 (777) 3293600, extensión 151
Fax: +52 (777) 3293 660
privera@tlaloc.imta.mx

Dr. José Luis Oropeza Mota
Dr. Mario Roberto Martínez Menes
Dr. Enrique Mejía Sáenz

Postgrado de Hidrociencias
Colegio de Postgraduados
km 36.5 carretera México-Texcoco
56230 Montecillo, Texcoco, Estado de México, México
Teléfono: +52 (595) 9520 200
oropeza@colpos.mx
mmario@colpos.mx
mejiasae@colpos.mx

Dr. Luis Mario Tapia Vargas

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas
y Pecuarias (INIFAP) Uruapan
Avenida Latinoamericana 1101
60080 Uruapan, Michoacán, México
Teléfono: +52 (452) 5237 392
tapia.luismario@inifap.gob.mx

Dr. Eusebio Jr. Ventura Ramos

Facultad de Ingeniería
Universidad Autónoma de Querétaro
Cerro de las Campanas s/n
76010 Querétaro, Querétaro, México
Teléfono: +52 (442) 1921 200
eventura@uaq.mx