

USO DE LLUVIA ARTIFICIAL PARA PARAMETRIZAR MODELOS DE PROCESOS HIDROLOGICOS



Editores:

Dr. Ignacio Sánchez Cohen

Dr. Jeffry Stone

Dr. Rodolfo Jasso Ibarra



CENID-RASPA

Libro Científico No. 1

**Uso de lluvia artificial
para parametrizar
modelos de
procesos hidrológicos**

Editores:
Dr. Ignacio Sánchez Cohen
Dr. Jeffrey Stone
Dr. Rodolfo Jasso Ibarra

SAGAR-INIFAP-CENID RASPA
IRD-ORSTOM
IWMI
ARS

Libro Científico No. 1
SAGAR -INIFAP-CENID RASPA
IRD-ORSTOM
IWMI
ARS
PRIMERA EDICIÓN, JUNIO DE 1999.
ISBN 968-800-438-3
IMPRESO Y HECHO EN MÉXICO
CENID-RASPA
Km 6.5 margen derecha Canal Sacramento
Gómez Palacio, Dgo.
Apdo. Postal 41
35150 Cd. Lerdo Dgo. MÉXICO
Tels.: (17) 19-10-76 y 19-10-77, Fax: (17) 19-11-34

SUPERVISIÓN TÉCNICA:

Dr. Ignacio Sánchez Cohen

Dr. Rodolfo Jasso Ibarra

EDICIÓN Y CORRECCIÓN DE ESTILO:

Ing. Raquel Anguiano Gallegos

Los trabajos publicados son responsabilidad absoluta de los autores. Se autoriza la reproducción parcial o total del contenido de los mismos cumpliendo con la acreditación correspondiente.

INVESTIGADORES PARTICIPANTES

- Asseline, Jean Laboratoire d'Hydrologie, Institute de Recherche pour le Développement. Montpellier, Francia.
- Báez González, Alma Delia Centro Nacional de Investigación para Producción Sostenible (INIFAP-SAGAR). Morelia, Mich., México.
- Gutiérrez Ronquillo, Esteban Campo Experimental La Campana, (INIFAP-SAGAR). Chihuahua, Chih. México.
- Jasso Ibarra, Rodolfo Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera (INIFAP-SAGAR). Gómez Palacio, Dgo., México.
- Martínez Rodríguez, Juan Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera (INIFAP-SAGAR). Gómez Guillermo Palacio, Dgo., México.
- Melgoza Castillo, Alicia Campo Experimental La Campana (INIFAP-SAGAR). Chihuahua, Chih., México.
- Paige, Ginger South West Watershed Research Center (ARS-USDA). Chihuahua, Chih., México.
- Sánchez Cohen, Ignacio Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera (INIFAP-SAGAR). Gómez Palacio, Dgo., México.
- Simanton, J. Roger South West Watershed Research Center (ARS-USDA). Tucson , AZ, Estados Unidos.
- Stone, Jeffrey J. South West Watershed Research Center (ARS-USDA). Tucson , AZ, Estados Unidos.
- Tapia Vargas, Mario Centro Nacional de Investigación para Producción Sostenible (INIFAP-SAGAR). Morelia, Mich., México.
- Tiscareño López, Mario Centro Nacional de Investigación para Producción Sostenible (INIFAP-SAGAR). Morelia, Mich., México.
- Velázquez Valle, Miguel Centro Nacional de Investigación para Producción Sostenible (INIFAP-SAGAR). Morelia, Mich., México.

CONTENIDO

Página

Contenido

Prefacio

Capítulo I

GENERALIDADES SOBRE SIMULACION DE LLUVIA	1
1.1 Introducción.	1
1.2 Ventajas.	3
1.3 Desventajas.	4
Referencias Bibliográficas	5

Capítulo II

PLANEACION DE INVESTIGACION CON SIMULADORES DE LLUVIA	7
2.1 Introducción.	7
2.2 Planteamiento del Problema.	7
2.3 Diseño Experimental.	8
2.4 Características de la Aplicación del Agua.	10
2.5 Características de los Tratamientos Ensayados.	11
2.6 Mediciones.	11
Referencias Bibliográficas	12

Capítulo III

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL EN PRUEBAS CON UN SIMULADOR DE LLUVIA ROTATORIO	15
3.1 Introducción.	15
3.2 Procedimientos.	15
3.3 Características de las parcelas.	18
3.4 Tratamientos en los lotes de erosión grandes.	20
3.5 Tratamiento en lotes de erosión pequeños.	21
3.6 Determinación del contenido de humedad.	22
3.7 Determinación de la densidad aparente	22

3.8 Escurrimientos y sedimentos.	23
3.9 Procedimientos de laboratorio.	24
Referencias Bibliográficas	26

Capítulo IV

TIPOS DE SIMULADORES DE LLUVIA	27
4.1 Introducción.	27
4.2 Características deseables en los simuladores de lluvia.	28
4.3 Tipos de simuladores de lluvia.	28
4.4 Comentarios Finales.	43
Referencias Bibliográficas	55

Capítulo V

ANÁLISIS DE INFORMACIÓN EN ESTUDIOS CON SIMULADORES DE LLUVIA	57
5.1 Introducción.	57
5.2 Análisis de información.	57
5.3 Análisis de una prueba con simulador tipo rotatorio.	61
5.4 Síntesis de Información.	63
5.5 Análisis de una prueba con un simulador tipo Asseline-Valentine.	65
5.6 Cálculo de Parámetros.	68
5.7 Códigos usados (símbolos).	70
5.8 Comentarios finales.	72
Referencias Bibliográficas	73

Capítulo VI

ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS PARA LA MODELACIÓN DEL ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL Y EROSIÓN HÍDRICA.	75
6.1. Introducción.	75
6.2. Naturaleza del proceso erosivo.	77
6.3. Modelación de la pérdida de suelo.	78
6.3.1 Generalidades sobre simulación hidrológica.	80
6.3.2 Tipos de modelos de simulación.	80

6.3.3 Escurrimiento superficial (Q).	82
6.3.4 Escurrimiento máximo (Qp).	85
6.4 Estimación de CN, C, LS y K en pastizales semiáridos.	89
6.5 Comentarios finales.	93
Referencias Bibliográficas	95

Capítulo VII

SIMULACIÓN DE LLUVIA PARA LA CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE EROSIÓN DE SUELOS BAJO LABRANZA CONVENCIONAL Y LABRANZA CERO.

7.1. Introducción.	99
7.2 El Problema del Lago de Pátzcuaro.	101
7.3 Los simuladores de lluvia en la investigación.	102
7.4 Aspectos Metodológicos.	103
7.5 Tratamientos de Labranza.	104
7.6 Simulación de Lluvia.	104
7.6.1. Desprendimiento Laminar.	104
7.6.2. Desprendimiento en Canalillos.	105
7.6.3. Conductividad Hidráulica Saturada.	106
7.7 Caracterización de los Procesos Erosivos.	107
7.7.1. Desprendimiento Laminar (Di).	107
7.7.2. Desprendimiento en Canalillos (Dr).	109
7.8 Conductividad Hidráulica Saturada (K_s).	110
7.9 Comentarios finales.	113
Referencias Bibliográficas	113

PREFACIO

La ciencia moderna ha aceptado que la modelación y simulación de procesos es el recurso científico más viable para enfrentar problemas ambientales donde el recurso agua es el factor principal. Es por esto, que en épocas recientes las universidades y otras instituciones de educación superior han incluido en sus materias curriculares cursos sobre este tópico permitiendo a los educandos expandir sus habilidades analíticas y de planteamiento de soluciones a problemas complejos.

Existen diversos métodos de aproximación para la solución de problemas los cuales varían desde métodos completamente empíricos hasta aproximaciones físicamente basadas las cuales brindan mayor oportunidad de uso al considerar procesos con fundamento en leyes comprobadas. Así, los estudios donde se tiene un control sobre las variables ofrecen mayor facilidad en su análisis que aquellos donde la aleatoriedad juega un papel predominante. Sin embargo, es necesario conocer la función de la aleatoriedad en aras de utilizar sus parámetros en los procesos de simulación.

Aunque el desarrollo científico respecto a la conservación de suelos data desde 1800, en el siglo XX, los procesos que promueven la degradación del medio ambiente, han llamado la atención de la investigación desde hace algunas décadas al sentir el impacto sobre la productividad de los recursos naturales agua y suelo principalmente. De esta manera, el estudio del proceso de erosión de los suelos ha sido investigado por diversos científicos y se han propuesto métodos de aproximación para su cuantificación. El avance de la tecnología ha hecho uso de diversos mecanismos y herramientas para profundizar en el estudio de las variables que involucran los procesos de degradación

Hace algunos años, la investigación en erosión se enfocaba a dar soluciones simples al problema de degradación de los suelos promoviendo el uso de prácticas de conservación, mismas que han sido ampliamente difundidas. Sin embargo, la magnitud del problema ha puesto de manifiesto la necesidad de utilizar procesos analíticos capaces de explicar el comportamiento de los sistemas productivos bajo diferentes escenarios de manejo. Así, los estudios pioneros sobre erosión utilizaban métodos de análisis poco fundamentados, aunque constituyeron la base para

asentar la necesidad del desarrollo de investigación básica que respondiera preguntas de mayor cobertura.

Para el caso de erosión de suelos, contaminación e infiltración, los simuladores de lluvia han venido a ofrecer una opción para cuantificar el efecto combinado de diferentes variables que involucran los procesos mencionados. Por ejemplo, se han realizado estudios para parametrizar la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo propuesta por Wischmeier y Smith en 1965 bajo diferentes prácticas de manejo permitiendo conocer el peso relativo de cada parámetro en la predicción de la tasa de pérdida de suelo.

En estudios de contaminación, los simuladores de lluvia permiten conocer las tasas de infiltración y el transporte de contaminantes cuando se usan junto con lisímetros en los que se mide el volumen de drenaje y en laboratorio se desarrolla el análisis cuantitativo y cualitativo de los contaminantes presentes en las muestras colectadas. Esto permite conocer el impacto de la intensidad de precipitación y el manejo del suelo sobre la lixiviación de contaminantes. De igual manera, se pueden realizar estudios de lixiviación de productos foliares en cultivos o el poder de adherencia de sustancias a diferentes superficies.

El objetivo de la presente obra es presentar información en español relativo al uso y manejo de simuladores de lluvia para parametrizar modelos de simulación de procesos hidrológicos. La obra consta de siete capítulos cubriendo los aspectos básicos de investigación, descripción de los simuladores, procedimientos experimentales y de análisis de información así como resultados de algunos estudios realizados en el país en el contexto del manejo integrado de cuencas hidrológicas.

Los autores son investigadores que han participado directa o indirectamente en proyectos en colaboración con el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias de la Secretaría de Agricultura Ganadería y Desarrollo Rural de México, (SAGAR INIFAP). Las instituciones internacionales directamente involucradas son el Servicio de Investigación Agrícola de Los Estados Unidos de Norteamérica perteneciente al departamento de Agricultura de aquel país (USDA ARS), el Instituto de Investigación para el Desarrollo de Francia (IRD antes ORSTOM) y el Instituto Internacional de Manejo de Agua (IWMI) con sede en Sri Lanka.

Se espera que esta publicación sirva como material que proporcione herramientas científicas para quienes deseen participar en el estudio de los procesos del movimiento del agua y sus constituyentes dentro del sistema suelo-planta-atmósfera, reconociendo que el material aquí compilado constituye un esfuerzo inicial que se irá fortaleciendo con el avance tecnológico y las aportaciones que investigadores, técnicos y usuarios en general pudieran realizar.

Los Editores

Capítulo I

GENERALIDADES
SOBRE
SIMULACION DE LLUVIA

Ignacio Sánchez Cohen
Jeffrey J. Stone

1.1 Introducción.

El estudio del comportamiento de variables hidrológicas bajo diferentes regímenes de humedad e intensidades de precipitación ha sido el paradigma de numerosos estudios que reporta la literatura. La finalidad de estos estudios ha sido proveer información concerniente al impacto del manejo del suelo y la vegetación sobre la producción de escurrimiento y erosión. Sin embargo, la alta variabilidad en espacio y tiempo de la precipitación ha puesto de manifiesto la necesidad de desarrollar investigación en donde se tenga control de las variables de interés.

En tal virtud, desde 1930 se han realizado estudios en praderas naturales con el objetivo de investigar aspectos fundamentales de los procesos de precipitación-escurrimiento-erosión. La herramienta fundamental en estos estudios ha sido los simuladores de lluvia o infiltrómetros de los que, actualmente, existe gran gama. A medida que crece la complejidad en el uso y manejo de la tierra arable por la presión del crecimiento demográfico, los problemas añadidos de degradación por pérdida de suelo y/o contaminación requerirán de técnicas modernas de simulación y de experimentación intensiva y extensiva. La finalidad de estos estudios será la de parametrizar diversos modelos de simulación de forma tal que los resultados tengan aplicabilidad universal ampliando así las posibilidades de mantener una agricultura sustentable que garantice la supervivencia de la población actual sin que comprometa el bienestar de las generaciones futuras.

La simulación de lluvia provee de un mecanismo fácil y económico para la obtención de gran volumen de información bajo condiciones controladas en un tiempo relativamente corto. En consecuencia, esto permite hacer comparaciones

del comportamiento de fenómenos como infiltración bajo diferentes sistemas de manejo. Como se detalla en otro capítulo, los dos componentes básicos de un estudio con simuladores de lluvia son el tipo de simulador y el diseño experimental.

La simulación de lluvia es la técnica de aplicar agua a parcelas experimentales de una manera similar a la precipitación natural; ésta es una herramienta que ha sido usada ampliamente en estudios de erosión, infiltración y escurrimiento. Todos los simuladores de lluvia (llamados también infiltómetros), tienen ciertas características en común como:

- Portátiles
- Fuente de energía y agua
- Variación del mecanismo de rociado
- Instrumentos de control y medición

En el alcance de los programas de investigación, sus objetivos y metas son los que determinan el tipo de simulador más conveniente para solventar las necesidades. De esta manera, existen simuladores que requieren de cierta magnitud en el transporte, grandes cantidades de agua y ciertas características en los mecanismos de control y medición. Sin embargo, sin pérdida de generalidad, cualquier tipo de simulador de lluvia provee de información precisa si se manipula bajo las condiciones de diseño y se respetan las consideraciones bajo las cuales se planteó su construcción.

La vasta mayoría de los simuladores han sido calibrados tratando de que la energía cinética y la forma de las gotas de lluvia sean lo más cercano posible a aquellas de las precipitaciones naturales. Algunos simuladores modifican la intensidad de precipitación al incrementar la presión de operación, otros lo hacen incrementando la velocidad de rotación o incrementando el número de boquillas en operación. Los dos últimos casos son los más recomendables, ya que al incrementar la presión de operación se corre el riesgo de disminuir el diámetro de gota, lo cual ha sido constatado por numerosos estudios que asientan que es poco factible mantener un diámetro de gota constante sin deterioro en la tasa de aplicación. La Tabla 1.1 muestra un ejemplo de la variación del diámetro de gota al incrementar la intensidad en un simulador de lluvia (infiltrómetro) tipo ORSTOM-Asseline.

Tabla 1.1 Variación del diámetro de gota en función de la intensidad de precipitación.

Diámetro de gota (mm)	Intensidad (mm h ⁻¹)					
	37	45	60	90	120	140
D25	0.47	0.61	1.03	0.89	0.79	1.01
D50	0.84	1.06	1.49	1.34	1.35	1.67
D75	1.22	1.59	2.10	2.07	2.16	2.47

En la planeación de estudios que involucren uso de simuladores de lluvia, en aras de tener una apreciación objetiva y evitar falsas expectativas, se deberá tener presente las siguientes consideraciones.

1.2 Ventajas.

Los simuladores de lluvia son eficientes. Dado el grado de control que se tiene sobre estos aparatos, el costo por unidad de información colectada es bajo comparado con los costos de experimentos bajo condiciones de precipitación naturales. En este último tipo de experimentación, la inversión inicial es alta dada la instrumentación requerida. De igual manera, el costo del personal calificado para realizar las mediciones hace la gran diferencia en estudios donde se desea mantener precisión y obtener información de calidad. Se ha documentado en diversos estudios que el costo del personal (salarios, viáticos, etc.) conlleva la mayor parte del presupuesto de la investigación.

Con los simuladores de lluvia se tiene control absoluto en términos de dónde y cuándo se colectará la información, las condiciones de las parcelas a ser estudiadas, y dentro de las características de diseño, las tasas y cantidades de lluvia a ser aplicadas. Bajo condiciones naturales puede tomar varios años capturar la variabilidad temporal de la precipitación (intensidad y frecuencia), secuencias de manejo del suelo y vegetación y etapas de crecimiento de cultivos de tal manera que permitan el desarrollo de análisis válidos y veraces. Así pues, el grado de control que se tiene sobre los simuladores de lluvia, provee una técnica para la colección de información de calidad en tiempos relativamente cortos.

1.3 Desventajas.

Los simuladores de lluvia tienen altos requerimientos de inversión inicial para su construcción y uso dado los materiales necesarios y el ensamblaje, además, algunos de ellos requieren cierto número de personas para su operación.

El tamaño de las parcelas es pequeño variando desde una fracción de metro cuadrado hasta varios cientos de metros cuadrados, dependiendo del diseño del simulador. Estas áreas pueden o no ser representativas del área de interés. Por ejemplo, las madrigueras de roedores y otros animales, arbustos grandes, etc., pueden distorsionar los resultados.

La mayoría de los simuladores no producen distribuciones del tamaño de gota representativos de las precipitaciones naturales. Por ejemplo, los simuladores tipo formadores de gota (usan agujas para formar gotas) producen tamaños de gota en un rango muy reducido y este tamaño sólo puede ser ajustado cambiando el diámetro interno de las agujas dado que si se incrementa la presión de operación, el goteo intermitente se convertiría en chorro. Por otro lado, los simuladores que utilizan aspersores proveen de una amplia gama de diámetros de gota pero son más pequeñas que aquellas gotas que generan las tormentas.

Algunos tipos de simuladores no son capaces de producir intensidades de precipitación con las variaciones temporales representativas de la precipitación natural. Algunos otros, son capaces de producir diferentes intensidades, pero sólo se pueden variar entre pruebas, pero no dentro de una misma prueba.

Otros simuladores no producen gotas que se aproximen a la velocidad terminal de las gotas naturales. Las velocidades menores, en combinación con distribuciones de tamaño de gota pequeña, resultan en energía cinética más baja que la que producen las lluvias naturales. Así, la energía cinética de simuladores tipo aspersor, llega a ser sólo el 40-50 por ciento de las lluvias naturales. Sin embargo, existen simuladores cuyos aspersores están colocados de tal manera que, bajo determinada presión de operación, producen energía cinética muy similar a la de condiciones naturales.

Referencias Bibliográficas

- Asseline, J., y C. Valentin. 1977. Construction et Mise au Point d'un Infiltrometre à Aspersion. ORSTOM. 33 pp.
- Asseline, J., E. Custode, G. De Noni, A. Lopez, C. Lopez G. Trujillo, M. Viennnot. 1993. Estudio de la Erosión y de las Prácticas de Conservación de Suelos en Varias Zonas Representativas del Ecuador. La Simulación de Lluvia. Informe Técnico.
- Meyer, L. D. 1994. Rainfall Simulators for Soil Erosion Research. In Soil Erosion Research Methods, Ed. R. Lal, 83-104. Soil and Water Construction Society.
- Renard, R. G. 1986. Rainfall Simulators and USDA Erosion Research: History Perspective and Future. In Proceeding of the Rainafall Simulation Workshop. Tucson, AZ. pp 3-6.

Capítulo II

PLANEACION DE INVESTIGACION CON SIMULADORES DE LLUVIA

Jeffry J. Stone
Ginger Paige
Ignacio Sánchez Cohen

2.1 Introducción.

Los simuladores de lluvia constituyen una herramienta para la adquisición de información en campo relativa a las características hidrodinámicas del suelo. Esta información es fundamental en la planeación del manejo de los recursos naturales, cuya calidad depende de la exactitud de los datos que se derivan de las pruebas experimentales. La planeación de las pruebas con simuladores de lluvia constituye la base de las acciones de manejo, y forma parte del ciclo recurrente de las actividades anteriores y a las de evaluación de las respuestas del sistema. Por lo tanto, es de gran importancia el hecho de que la ejecución de las pruebas experimentales esté respaldada por un proceso de planeación cuidadoso que garantice calidad aceptable de los datos experimentales. En el presente Capítulo se exponen los aspectos más determinantes que deben considerarse al diseñar pruebas experimentales en las que se emplean simuladores de lluvia.

2.2 Planteamiento del Problema.

Los factores esenciales en experimentos con simuladores de lluvia en tierras de pastizal han sido los que a continuación se enlistan, aunque estos pueden aplicarse en muchos otros ambientes:

- Medición del proceso de infiltración
- Relacionar las tasas de infiltración con el uso del suelo o las características de éste y la vegetación
- Parametrizar modelos de infiltración

Estimar estos parámetros mediante características fácilmente medibles de vegetación y suelos. El impacto de esos factores es diferente en función de la magnitud de las parcelas de estudio y afecta la manera en que se obtienen y analizan los datos.

Las parcelas pequeñas tienen la ventaja de que minimizan la heterogeneidad natural del suelo y vegetación y, en estudios de infiltración y escurrimiento, alcanzan el estado estacionario relativamente rápido. La principal desventaja es que la cantidad absoluta de escurrimiento durante las etapas iniciales de la prueba es pequeña, por lo que el error en las mediciones se convierte en un factor importante del estudio, pudiendo llegar a existir una variabilidad considerable entre las parcelas.

Por el contrario, las parcelas grandes tienen la ventaja de que la heterogeneidad se pondera en toda el área y que el hidrograma es mejor definido porque las tasas absolutas de éste son mayores. Sin embargo, los efectos de la variabilidad espacial son difíciles de medir directamente y el esfuerzo y costo de los estudios son mayores que los de las parcelas pequeñas. Además, dada la variabilidad espacial es difícil conocer si la totalidad de la parcela contribuye a la producción de escurrimiento si se utiliza sólo una tasa de precipitación.

Los estudios realizados en ambas escalas no miden la infiltración directamente sino que ésta se calcula a partir de la tasa de escurrimiento superficial. En parcelas pequeñas el tiempo de muestreo entre lecturas es de cinco minutos, y los resultados se expresan en tasas finales de infiltración las cuales se calculan extrayendo la tasa de precipitación de la tasa final de escurrimiento. En las parcelas grandes es necesario utilizar algún modelo de infiltración para calcular su tasa lo cual presenta el problema inverso donde el hidrograma tiene que ser decodificado para calcular la precipitación en exceso y posteriormente la infiltración.

2.3 Diseño Experimental.

Entre los factores más importantes a considerar en la planeación y/o diseño experimental utilizando simuladores de lluvia se encuentran:

- Características deseables de la aplicación del agua (tasas, duración y número de corridas)
- Tamaño de la parcela de estudio

- Tratamientos a evaluar
- Mediciones a realizar

La mayoría de los estudios utilizan una sola tasa de aplicación de lluvia por un período de tiempo determinado (usualmente 45 a 60 minutos). Cuando se desea variar el contenido inicial de humedad, comúnmente éste se induce 24 horas antes de una corrida. El tamaño de parcela utilizado normalmente es de un metro cuadrado y los tratamientos evaluados han sido niveles de pastoreo, intensidades de precipitación y diferencias en cubierta vegetal y suelos. Las Tablas 2.1 y 2.2 muestran algunas características que se han evaluado en cuencas hidrológicas.

Tabla 2.1 Condiciones ensayadas en estudios con simuladores de lluvia utilizando parcelas pequeñas.

Simulador	Intensidad (mm h ⁻¹)	Condición antecedente	Mediciones	Tratamiento	Referencia
Formador de gota tipo Blackburn	208	Pre húmedo muy húmedo	Muestreo cada 30 min	Pastoreo	McCalla <i>et al.</i> , 1984
	153		Muestreo cada 5 min	Pastoreo	McGinty <i>et al.</i> , 1979
	140		Muestreo cada 28-30 min	Cubierta vegetal	Blackburn <i>et al.</i> , 1990
Malekuti	64-127	Pre humedo, húmedo y muy húmedo	Variable	Pastoreo	Devaurs y Gifford, 1986
Meyer y Hgarmon	110	Pre húmedo, húmedo	Muestreo cada 30 min	Vegetación	Pluhar <i>et al.</i> , 1987
Wilcox	103	Pre húmedo, húmedo	Muestreo cada 5 min	Vegetación	Wilcox <i>et al.</i> , 1988

Tabla 2.2 Condiciones ensayadas en estudios con simuladores de lluvia utilizando parcelas grandes.

Simulador	Intensidad (mm h ⁻¹)	Condición antecedente	Mediciones	Tratamiento	Referencia
Tipo D1	76-86	Pre húmedo	Variable	Natural	Beutner <i>et al.</i> , 1940
Tipo F	102	Pre húmedo	Variable	Natural	Kincaid <i>et al.</i> , 1964
Oscilatorio	60	Seco, húmedo, muy húmedo	Escurrimiento con limnógrafo	Natural, suelo desnudo	Simanton y Renard, 1982
				Natural	Lusby y Litchy, 1983
USGS Oscilatorio	60-120	Seco, húmedo, muy húmedo	Escurrimiento con limnógrafo electrónico	Natural, suelo desnudo	Simanton, <i>et al.</i> , 1991

2.4 Características de la Aplicación del Agua.

La tasa de aplicación para simuladores tipo aspersor generalmente depende del tipo de esprea que utilice el aspersor, de la presión de operación, del número de aspersores y de la duración de la intermitencia. Los simuladores de lluvia que utilizan formadores de gota (agujas) varían sus tasas de aplicación a través de medidores de flujo. Normalmente en este tipo de artificios las tasas varían desde 60 hasta 150 mm h⁻¹, aunque en algunos casos se han usado tasas mayores. Algunos otros estudios tienden a simular la intensidad que ocurre con un determinado período de retorno aunque, como ya se asentó, la mayoría de los estudios simulan una sola tasa de aplicación de lluvia.

La selección de las tasas o intensidades de lluvia es muy importante en los estudios donde se utilicen simuladores, ya que se ha observado que la tasa de infiltración aparente decrece a medida que la intensidad de lluvia se incrementa. La explicación a esto es que a medida que la intensidad se incrementa, aquellas partes de la parcela que tienen alta capacidad de infiltración empiezan a producir escurrimiento resultando que, para las intensidades comúnmente ensayadas con los simuladores de lluvia, solo una porción de las parcelas contribuye a la producción de escurrimiento.

2.5 Características de los Tratamientos Ensayados.

La gran mayoría de los experimentos en parcelas pequeñas no han sido tratamientos inducidos sino que se selecciona el sitio que reúna las características deseadas y ahí se instala la parcela. Así, los tratamientos más comunes han sido diferentes intensidades de pastoreo incluyendo a un testigo. Otro ejemplo son las parcelas de estudio del proyecto nacional de Estados Unidos de Norte América llamado Proyecto para la Predicción de la Erosión por Agua (WEPP, por sus siglas en inglés) en el que los experimentos constan de tres parcelas de tres metros de ancho por diez de largo que contienen vegetación natural, otra en la que se corta la vegetación al ras del suelo, y un último tratamiento que consiste de suelo desnudo. En sitios inmediatamente adyacentes se instalan otras dos parcelas de menores dimensiones, 0.6 por 1.0 metros de ancho y largo, respectivamente, son incluidas en las que se cuantifica el efecto de la precipitación sobre suelo desnudo y semi cubierto además de ser utilizadas para cuantificar la erosión laminar que ocurre en las áreas entre canalillos, y para separar los efectos del encostramiento en la infiltración los cuales son parámetros del WEPP.

2.6 Mediciones.

La tasa de infiltración es deducida del hidrograma sea como tasa de infiltración constante o calculada mediante un modelo de infiltración. Algunas mediciones auxiliares incluyen el contenido inicial de humedad del suelo, características del suelo y vegetación, así como microtopografía. Estas características se usan para desarrollar ecuaciones de regresión que relacionen las tasas finales de infiltración con las características de las parcelas, o en estimación de parámetros de modelos de infiltración y escurrimiento.

Muchos experimentos permiten calcular la tasa de escurrimiento tomando un volumen de agua como muestra intermitente y dividiendo este valor por la duración del muestreo. Un intervalo común de muestreo es de cinco minutos, sin embargo, esto depende de la precisión deseada en las diferentes etapas del hidrograma, así, en parcelas pequeñas bajo intensidades de precipitación pequeñas en suelos ligeros la producción de escurrimiento podrá ser mínima, por lo que la intensidad del muestreo deberá ser continua (1-3 minutos) con intervalos de 0.5-1 minuto durante la parte ascendente del hidrograma. En parcelas pequeñas las muestras de sedimento son útiles para estimar la erosión entre canalillos, ya

que la energía potencial del agua inducida como escurrimiento no es suficiente para cuantificar la erosión en canalillos, de ahí, que los simuladores de lluvia que utilizan parcelas de un metro cuadrado sean usados más como infiltrómetros para comparar los valores de esta variable bajo diferentes coberturas y tipos de suelo. Algunos simuladores utilizan mecanismos automatizados para medición del escurrimiento por medio de graficadores o vertedores que proveen de mediciones precisas cuando se calibran para las condiciones de uso.

Las características de la parcela como propiedades de la superficie del suelo y cubierta vegetal se miden primeramente para desarrollar relaciones funcionales entre tasas finales de infiltración y estas características, o para desarrollar ecuaciones que estimen los parámetros de modelos de infiltración como el de Green y Ampt modificado por Mein y Larson. El contenido inicial de humedad se mide mediante muestreos gravimétricos y las características de la vegetación se miden utilizando diversas técnicas. Casi todos los experimentos de simuladores de lluvia pueden ser clasificados como de estado estacionario, y no de parámetros distribuidos puesto que la tasa de infiltración se calcula mediante la diferencia entre la intensidad de aplicación del agua y el escurrimiento en el estado de equilibrio (cuando se hace constante) y además, la tasa de escurrimiento es medida a la salida de las parcelas (en el punto topográficamente más bajo). Una característica inherente a todos los experimentos es que se asume que en el estado de equilibrio, toda la parcela esta contribuyendo a la producción de escurrimiento.

Referencias Bibliográficas

- Beutner, E.L., R.R. Gaebe, and R. E. Horton. 1940. Sprinkler-plat runoff- and infiltration experiments on Arizona desert soil. *Trans. AGU*. Pp. 550-558.
- Blackburn, W. H., R. O. Meeuwig, and C. M. Skau. 1974. A mobile infiltrometer for use on rangelands. *J. Range Management*. 27: 322-323.
- Blackburn, W. H., F. B. Pierson, and M. S. Seyfried. 1990. Spatial and temporal influence of soil frost on infiltration and erosion of sagebrush rangelands. *Water Resources Bulletin*. 26(6): 991-997.
- Bubenzer, G. D. 1979. Inventory of rainfall simulation. In *Proceedings of the Rainfall Simulator Workshop*, Tucson. AZ. ARM-W-10: 120-130.

- Devaurs, M. And G.F. Gifford. 1986. Applicability of the Green and Ampt infiltration equation to rangelands. *Water Resources Bulletin* 22(1): 19-26.
- Dortignac, E. J. 1951. Design and operation of Rocky Mountain infiltrometer. Station Paper No. 5 USDA-FS. Rocky Mountain Forest Experiment Station, Ft. Collins, Co.
- Johnson, C. W. And N. D. Gordon. 1988. Runoff and erosion from rainfall simulator plots on sagebrush. *Trans. ASAE* 31(2): 421-427.
- Kincaid, D.R., J. L. Gardner, and H. A. Shreiber. 1964. Soil and vegetation parameters affecting infiltration under semi-arid conditions. *IASH Publ.* 65. 440-453.
- Kuczera, G. And E. Patterson. 1993. Estimation of infiltration and overland flow parameters using a portable sprinkler infiltrometer. *Hydrology and Water Resources Symposium*. Newcastle, Aus.
- Lusby, G.C. and R. W. Lichty. 1983. Use of rainfall simulator data in precipitation runoff modeling studies. U.S.G.S. *Water Resources Investigation Report* 83-4159.
- McCalla II, G. R., W.H. Blackburn, and L.B. Merrill. 1984. Effects of livestock grazing on infiltration rates, Edwards Plateau of Texas. *J. Range Management*. 37(3): 265-269.
- McGinty, W. H., F. E. Smeins, and L. B. Merrill. 1978. Influence of soil, vegetation and grazing management on infiltration rate and sediment production of Edwards Plateau rangeland. *J. Range Management*. 32: 33-37.
- Meyer, L. D. and D. L. McCune. 1958. Rainfall simulator for runoff plots. *Agricultural Engineering*. 39(10): 644-648.
- Meyer, L. D. 1979. Methods for attaining rainfall characteristics in rainfall simulators. In *Proceedings of the Rainfall Simulator Workshop*. ARM-W-10. Pp 35-44.
- Meyer, L.D. and W. C. Harmon. 1979. Multiple Intensity rainfall simulator for erosion research on row side slopes. *Trans. ASAE*. 22: 100-103.
- Mutchler, C. K. and L. F. Hermsmeier. 1965. A review of rainfall simulators. *Trans. ASAE*. 8(1): 67-68.
- Pluhar, J. J., R. W. Knight, and R. K. Heitschmidt. 1987. Infiltration, rates and sediments productions as influenced by grazing systems in the Texas rolling plains. *J. Range Management*. 40(3): 240-243.
- Simanton, J. R. And K. G. Renr. 1982. Seasonal change in infiltration and erosion from USLE plots in southeastern Arizona. *Hydrology and Water Resources in Arizona and the Southwest*. Office of Arid Land Studies. Univ. of Arizona, Tucson. 12: 37-46.

- Simanton, J.R., M.A. Weltz, and H. D. Larsen. 1991. Rangeland experiments to parameterize the water erosion prediction project model: vegetation canopy cover effects. *J. Range Management*. 44(3): 276-282.
- Ward, T. J. 1986. A study of runoff and erosion processes using large and small area rainfall simulators. Technical Completion Report. Project No. 1423672. New Mexico Water Resources Research Institute. 71 p.
- Ward, T. J. and S. M. Bolton. 1991. Hydrology parameters for selected soils in Arizona and New Mexico as determined by rainfall simulation. Technical Completion Report. Project No. 1423698. New Mexico Water Resources Research Institute.
- Weltz, M. A., A. A. Arslan, and L. J. Lane. 1991. Hydraulic roughness coefficients for native rangelands. *ASCE Journal of Irrigation and Drainage*.
- Wilcox, B. P., M. K. Wood, and J. M. Tromble. 1988. Factors influencing infiltrability of semiarid mountain slopes. *J. Range Management*. 41: 197-206.
- Wood, M. K., G. B. Donart, and M. A. Weltz. 1986. Comparative infiltration rates and sediment production on fertilized and grazed blue grama rangeland. *J. Range Management* 39(4): 371-374.

Capítulo III

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL EN PRUEBAS CON UN SIMULADOR DE LLUVIA ROTATORIO

J. Roger Simanton
Ignacio. Sánchez Cohen
Rodolfo Jasso Ibarra

3.1 Introducción.

La buena conducción de una caracterización de sitios en campo, se inicia con la selección adecuada de los lugares en los que se desarrollarán las simulaciones de lluvia. Con fines de parametrizar modelos de erosión y/o escurrimiento se ha definido que los lotes experimentales deberán tener dimensiones de 3 y 10.6 metros de ancho y longitud, respectivamente, con una pendiente que oscilará entre 6 y 12 por ciento. La longitud y pendiente se basan en las características de energía cinética del agua de escurrimiento para que la erosión en canalillos pueda ser cuantificada.

Los sitios o parcelas con las características de suelo y de vegetación deben ser representativas del área de estudio e incluir diferentes prácticas de manejo, puesto que la finalidad del trabajo es ubicar aquellas prácticas que minimicen el deterioro y garanticen la sustentabilidad de los recursos naturales.

3.2 Procedimientos.

En cada sitio seleccionado se deben colocar las parcelas de 3 x 10.6 metros. Por las características de los simuladores de lluvia utilizados en estudios de erosión, las parcelas deben colocarse en pares con una distancia entre ellas de 2.5 a 2.7 metros, y de 7.6 a 10.6 metros entre pares de parcelas. El eje mayor de las parcelas deberá estar paralelo a la pendiente dominante, procurando que cada par de parcelas se encuentren en el mismo plano, como característica deseable pero no indispensable ya que los pares de parcelas podrán estar colocados en cualquier

sitio del área de estudio siempre que cumplan con las dimensiones y características señaladas. Después que el diseño de la colocación de las parcelas ha sido determinado, es necesario hacer mediciones de pendiente dentro de las parcelas entre las esquinas superiores e inferiores para constatar que han quedado colocadas con la pendiente deseada. Es necesario también, colocar marcas distintivas en las esquinas (estacas de varilla metálica) para identificar cada parcela uniendo con hilo de color las estacas para delinear la parcela antes de colocar los bordes de metal.



Delimitación de la parcela experimental y colocación del dispositivo de aforo.

Los bordes de las parcelas consisten en hojas de metal de 3 y 1.5 metros de largo y 0.25 de ancho. Se deben colocar en cada lado 3 hojas de 3 metros y una de 1.5 metros, siendo esta última colocada en primer lugar aguas arriba de la parcela en cada lado. Las láminas terminales de cada lado aguas abajo de las parcelas

podrán ser de 0.25 ó 0.36 metros de ancho dependiendo de las condiciones del suelo. Así, se podrán utilizar láminas de 0.36 metros cuando el suelo es un tanto rocoso o ligero de tal manera que no permita un buen contacto suelo-lámina.

La colocación de las láminas metálicas podría requerir sólo de enterrarla siguiendo los hilos que delimitan el perímetro de la parcela o también de hacer un corte previo al suelo para facilitar su penetración. La humedad del suelo, las rocas, la vegetación o cubierta vegetal son factores que determinan la magnitud de las labores necesarias antes de enterrar las láminas en el suelo. Estas láminas se deberán enterrar al menos cinco centímetros, teniendo la "ceja" superior hacia afuera de la parcela de tal manera que el agua que cae en ese lugar drene en esa dirección. Las láminas del extremo inferior de las parcelas que reciben el escurrimiento, no deberán estar amarradas a las paredes laterales.

La "ceja" de estas láminas deberá quedar colocadas aguas abajo coincidiendo con la superficie del suelo. El contacto de estas paredes con el suelo deberá ser lo mejor posible procurando la mínima remoción del suelo.

Después de que las láminas del extremo inferior de las parcelas ha sido instalado se deberán colocar soportes para sostener al medidor de flujo en un área excavada con volumen suficiente para que el dispositivo funcione adecuadamente, para lo cual deberá estar nivelado y a una profundidad suficiente para que reciba el escurrimiento de la parcela que fluye a través de las láminas recolectoras. Estas láminas deberán engancharse a las láminas del borde inferior de la parcela para asegurar buen contacto.

Es necesario cavar una zanja aguas abajo del medidor de flujo para drenar el escurrimiento, procurando que no fluya sobre alguna de las parcelas colocadas aguas abajo. Al término del estudio deberá rellenarse toda excavación que se haya realizado.



Colocación del medidor de flujo en el extremo inferior de la parcela.

3.3 Características de las parcelas.

La cobertura de las parcelas deberá evaluarse antes de iniciar las simulaciones utilizando un equipo de monitoreo puntual (de agujas), el cual se colocará en cada una de las diez secciones preseleccionadas a lo largo de los bordes de las parcelas. Estas lecturas totalizarán 490 para microtopografía y 490 para vegetación. La primera lectura será la posición número uno aguas abajo de la parcela en el extremo inferior de la misma. Para evitar pisar las parcelas se usará un andamio metálico sobre el cual se desplazará el encargado de recolectar los datos. Las categorías de cubierta de la superficie a evaluar son:

Suelo desnudo

Grava (partículas mayores a 5 mm y menores a 2 cm)

Rocas (partículas mayores o iguales a 2 cm)
 Mantillo orgánico
 Vegetación basal
 Criptógamas

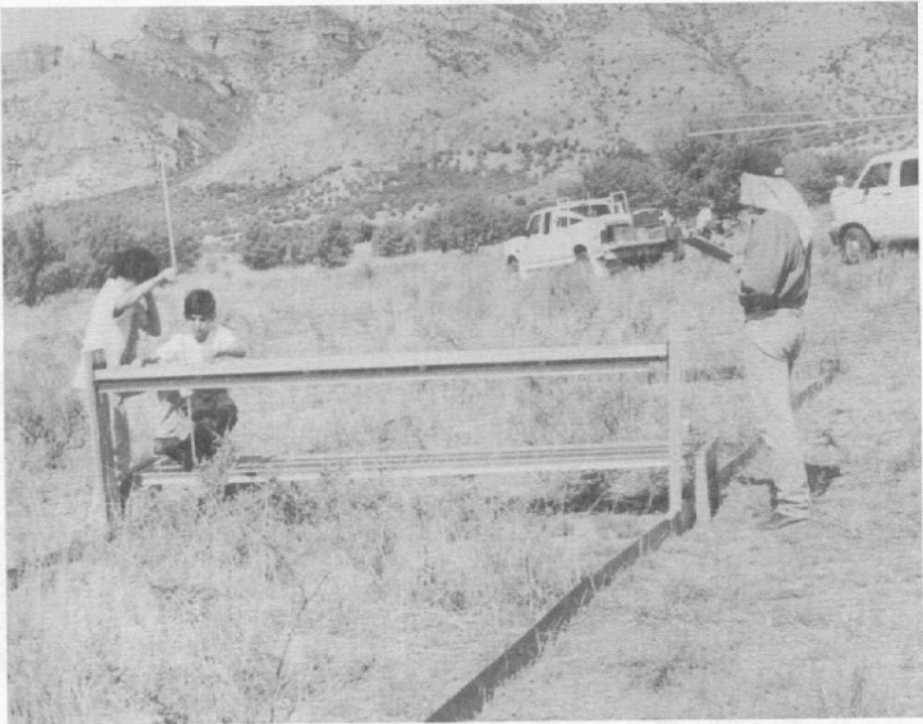
La siguiente tabla resume las abreviaciones características y límites de las observaciones en la evaluación de las parcelas.

Tabla 3.1. Criterios para la caracterización de las parcelas experimentales.

Abreviatura	Característica	Descripción
S	Suelo desnudo	Partículas minerales menores a 5 mm
G	Grava	Partículas minerales menores de 2cm y mayores a 5 mm
R	Rocas	Partículas minerales mayores de 2 cm
NL	Mantillo orgánico no persistente	Materia orgánica muerta removible por efecto del escurrimiento
PL	Mantillo orgánico persistente	Materia orgánica muerta no removible por efecto del escurrimiento
*	Vegetación basal	Vegetación viva en la superficie
CM	Asociación de musgos	Criptógamas con altura mayor a 5 cm
TM	Musgos altos	Criptógamas con altura entre 1 y 5 cm
OM	Otros musgos	Criptógamas entre 0 y 1 cm de altura
LI	Líquenes	
AL	Algas	

Las mediciones se realizan deslizando la aguja en cada punto. Así, si la aguja toca parte aérea de alguna planta, se codifica este dato y se sigue deslizando hasta que toque la superficie del suelo, y la característica que primero encuentre es también codificada.

Es necesario excluir un área adyacente a las parcelas experimentales de aproximadamente 4.6 m de ancho por 7.7 de largo, con la finalidad de tomarlas como referencia dadas las adecuaciones que se efectúan sobre las primeras para las pruebas de simulación de lluvia.



Evaluación del estado de superficie en las parcelas experimentales.

3.4 Tratamientos en los lotes de erosión grandes.

En general deberán colocarse cuatro lotes "naturales" de prueba en cada sitio de los estudios de erosión. Estos lotes permanecerán sin alteraciones colocando áreas de protección alrededor de cada par de parcelas de 1.5 por 7.5 metros, y se delimitarán con estacas e hilo para que puedan ser observadas. Es necesario evitar en la medida de lo posible el deambular por estas áreas, ya que en ellas se realizarán muestreos de suelo y vegetación.

3.5 Tratamiento en lotes de erosión pequeños.

En cada lote compuesto por un par de parcelas es necesario instalar otra de dimensiones más pequeñas (0.60 x 1.23 metros), en las que se medirá la erosión que ocurre cuando se remueve toda la vegetación y materia orgánica. Al igual que en las parcelas grandes, se instalarán láminas receptoras del escurrimiento con una salida en donde se concentra éste para ser aforado, y en el que se realizarán mediciones de sólidos en suspensión. Así también, se cavará una zanja para drenar el escurrimiento aguas abajo de las parcelas.



Colocación de pluviómetros para evaluar la variabilidad espacial de la precipitación.

El escurrimiento se medirá volumétricamente durante la simulación de lluvia, de ser posible se medirá el volumen que escurre en 30 segundos en la primera etapa de la prueba (porción creciente del hidrograma); es extremadamente importante que el tiempo de llenado de los recipientes colectores sea tomado con precisión, ya que mientras más sea este período, la medición tendrá menor

error. Otra opción es que las mediciones de escurrimiento se hagan cada dos minutos (seis muestras aproximadamente) durante la porción creciente del hidrograma, y cada 5-10 minutos (aproximadamente cinco muestras si la prueba se realiza sobre suelo seco; tres muestras si se realiza sobre suelo húmedo, y seis muestras en suelo muy húmedo) toda vez que se ha alcanzado el estado de equilibrio. La corrida en la condición antecedente de suelo muy húmedo constará de intensidades de aplicación variables, por lo que los intervalos de muestreo serán de dos minutos durante la transición entre intensidades. Las muestras de escurrimiento se usan para determinar la concentración de sedimentos en el agua que se produce en los lotes pequeños.

3.6 Determinación del contenido de humedad.

Para determinar el contenido antecedente de humedad del suelo antes de cada simulación de lluvia se toman seis muestras de la siguiente manera: la primera se toma adyacente a la parcela a dos profundidades (0-5 centímetros y 5-10 o hasta 20 centímetros si el suelo está seco). Las muestras constan de 100 gramos cada una. El sitio de muestreo para parcelas con condición antecedente seco deberá ser cercano al centro. Los otros muestreos deberán ser en la parte alta y baja de cada parcela considerando la pendiente. Los instrumentos de muestreo pueden ser pequeñas palas de jardinería o barrenas dependiendo del tipo de suelo. Es muy importante pesar inmediatamente después del muestreo o si esto no es posible, asegurarse que los contenedores de la muestra queden firmemente sellados para evitar pérdidas de humedad. En la transición de la simulación con contenido antecedente seco y la simulación con condición antecedente húmedo y muy húmedo es necesario realizar el muestreo de la misma manera que se describió anteriormente.

3.7 Determinación de la densidad aparente.

Antes de iniciar la simulación de lluvia en la condición antecedente seco se debe tomar una muestra en los primeros cinco centímetros de suelo lo más cercano posible a las parcelas pequeñas en donde se ha removido la vegetación, para estimar la densidad aparente del suelo por el método de volumen desplazado. El procedimiento general para este método es como sigue:

- En un área de 10 a 15 centímetros se deberá limpiar la superficie del suelo de tal manera que quede libre de rocas y materia orgánica.
- Es necesario cavar un orificio en el suelo de cinco centímetros de profundidad por diez de diámetro, recabando el suelo extraído y colocándolo en una bolsa de plástico para su posterior secado y pesado.
- Posteriormente se coloca un plástico que cubra el orificio lo más cerca posible a sus paredes para proceder al llenado con agua hasta el borde del orificio sin que el agua escurra, registrando el volumen utilizado.
- Para garantizar representatividad en el valor de densidad aparente es necesario realizar dos repeticiones de esta prueba, procurando abarcar áreas debajo de la vegetación existente y en áreas desnudas.
- La selección de los sitios a muestrear se hará en base al tipo de vegetación existente, a su densidad y condición.
- Finalmente la densidad aparente es el cociente entre el peso del suelo seco y el volumen de agua utilizado (gr cm^{-3}).

3.8 Esgurrimientos y sedimentos.

Para dar un seguimiento eficiente a las pruebas con los simuladores de lluvia es necesario codificar cada parcela con un número de identificación y algún otro detalle que la identifique, como la localización geográfica, nombre del sitio, número de corrida, o algún otro.

Después de que las parcelas han sido instaladas se iniciará la simulación en las en las parcelas que se hayan instalado primero. En las paredes aguas abajo de las parcelas se coloca unas canaletas, cuya función es la de dirigir el escurrimiento hacia los aforadores. Para evitar contabilizar la precipitación que pudiera caer directamente sobre estas canaletas se cubren con hojas de metal.

Para que el aforador quede firmemente ubicado, éste se nivela por medio de cuatro estacas colocadas en cada esquina de la base. Después de los ajustes necesarios para la colocación del aforador, éste deberá colocarse con una pendiente del 4 por ciento, lo cual se logra usando un nivel precalibrado y ajustando los tornillos niveladores en la base del mismo.

Antes de empezar una corrida se deberá asegurar que todo el material esté a la mano y el personal involucrado en sus respectivos sitios. El inicio de una corrida se considera cuando todas las boquillas del simulador están trabajando a su

capacidad (25-32 libras de presión para el simulador rotatorio), con una rotación de 4 a 5 revoluciones por minuto. En este punto se considera el inicio (tiempo cero) y todas las demás lecturas se referencian a ésta.

Aunque existen aparatos que automatizan el proceso de toma de datos en términos de obtener gráficamente la altura del agua en la garganta del aforador, en el presente caso se menciona el procedimiento para obtención de parejas de datos **tiempo-volumen**.

Dependiendo del tipo de suelo, durante los primeros minutos de la prueba, cuando el escurrimiento se ha establecido, se toman muestras de escurrimiento a intervalos de tiempo cortos (un minuto). Durante el estado estacionario del hidrograma (cuando éste no cambia con el tiempo) se toman muestras en períodos de 5 a 10 minutos y de 0.5 a 1 minuto durante la recesión.

Se deberá tomar la lectura de altura de agua en la garganta del aforador en cada evento de medición de escurrimiento y anotarlo en la hoja de la corrida. Este dato se correlacionará con el gasto dependiendo de la curva de calibración previamente obtenida.

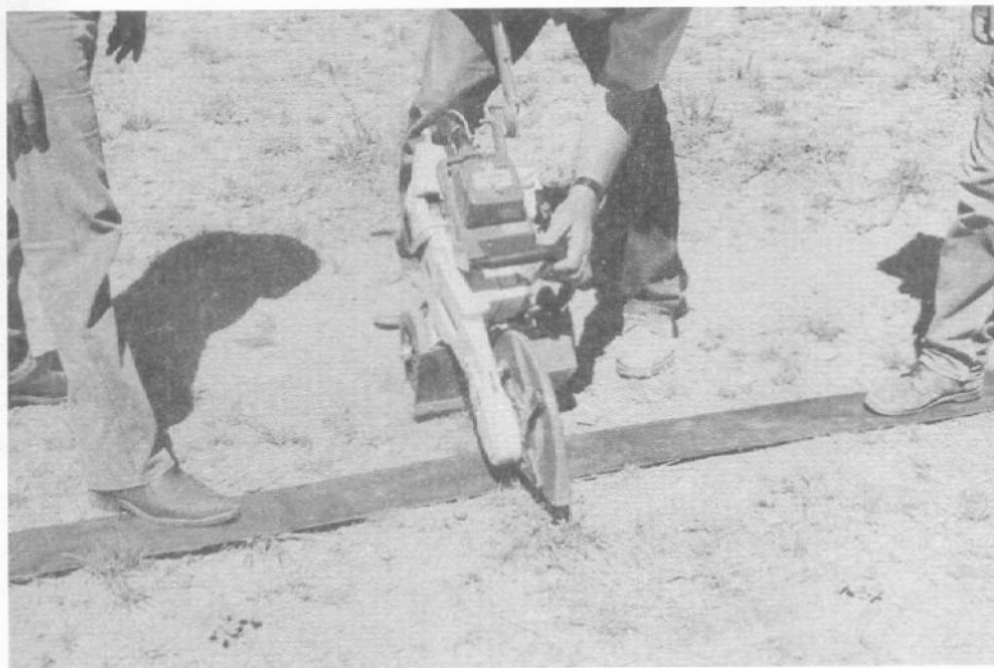
El muestreo de escurrimiento y sedimentos se lleva a cabo manualmente insertando un recipiente de volumen conocido en la salida del dispositivo aforador y permitiendo que se llene hasta tres centímetros antes del borde. En caso de poco flujo a través del medidor, la toma de la muestra no deberá durar más de medio minuto.

Se deberá anotar el tiempo al que la precipitación es detenida al término de la prueba y el tiempo al que cesa el flujo superficial. Es necesario tomar también la temperatura del agua, la velocidad y dirección del viento, y georreferenciar el sitio de la prueba.

3.9 Procedimientos de laboratorio.

El laboratorio de suelos deberá tener capacidad para manejar el número de muestras de sedimentos. La temperatura de las estufas de secado deberá ser colocada a 90 °C y mantenerse en esta temperatura cuando las muestras sean introducidas por un lapso de 24 horas. Deberán estar disponibles Al menos 200 recipientes de muestreo con capacidad de un litro procurando que estén limpios, secos y con peso conocido. De igual manera, se deberá disponer de botes de

aluminio para el muestreo de suelos. Las muestras del contenido antecedente de humedad del suelo deberán pesarse en el sitio de muestreo (peso en húmedo) mediante una balanza con aproximación de décimas de gramo.



Láminas que se utilizan en la delimitación de las parcelas de prueba.

Si los recipientes que contienen el sedimento parecieran ser bajos en contenido de limo y arcilla, es aconsejable dejarlos reposar por 12 ó 24 horas después de lo cual pueden ser decantados de tal manera que queden sólo unos tres centímetros de agua y sedimento. Posteriormente después de decantar las muestras, éstas deberán secarse a 90 °C por 24 horas. Luego que las muestras han sido removidas de las estufas deberán dejarse enfriar por lo menos una hora antes de proceder a su pesado.

Referencias Bibliográficas

- Sánchez C., I., V. L. Lopes, D. C. Slack, and M. M. Fogel. 1997. Water balance model for small-scale water harvesting systems. *Journal for Irrigation and Drainage Engineering*. Vol. 123, N° 2. Pag. 123-128
- Simanton, J. R. 1996. La Campana rainfall simulation experimental procedures. Unpublished document.
- Paige, G., and J. J. Stone. 1996. Measurement methods to identify and quantify spatial variability of infiltration on rangelands. Paper presented at the 1996 USDA-ARS Infiltration Conference. 13 pp.

Capítulo IV

TIPOS DE SIMULADORES DE LLUVIA

Ignacio Sánchez Cohen
Jean Asseline

4.1 Introducción.

La simulación de lluvia es la técnica de aplicar agua a parcelas experimentales de una manera similar a la precipitación natural; es una herramienta que ha sido usada por muchos años en estudios de erosión, infiltración y escurrimiento. Todos los simuladores de lluvia (o infiltrómetros) tienen ciertas características en común tales como: son portátiles, tienen fuente de energía y agua, lo que permite disponer de cantidades de precipitación cuando y donde se necesite; tienen un mecanismo de rociado con el cual variando los grados de control pueden abastecer diferentes intensidades y cantidades de precipitación; también existen mecanismos y/o procedimientos para la medición en las salidas de las parcelas.

La elección de un determinado tipo de simulador depende de parámetros de la precipitación como tamaño de gota, velocidad de impacto, intensidad de los eventos a simular, así como de los objetivos del proyecto. Las múltiples combinaciones que resultan de lo anterior ha conducido al desarrollo de numerosos tipos de dispositivos; los más comunes se describen en este Capítulo, desde el punto de vista de sus principios de diseño y características de operación.

4.2 Características deseables en los simuladores de lluvia.

Frecuentemente, cuando se conocen las características de la precipitación de un lugar determinado, el investigador no está en condiciones de elegir el tipo de simulador capaz de reproducir dichas características; por otro lado, dado que los simuladores existen no se ajustan en forma perfecta a la simulación requerida, aunque la elección debe basarse en los parámetros de lluvia a simular, es común que los usuarios tengan claramente establecida la importancia relativa de cada parámetro.

El primer paso en la elección y/o diseño de un simulador de lluvia, involucra el desarrollo de un listado de requerimientos o capacidades que deberá tener el aparato. Las características de la precipitación juegan un papel importante en este listado, por lo que se deberá atender especialmente las siguientes consideraciones:

- La distribución del tamaño de gota cercana a la real.
- Las velocidades de impacto cercanas a aquellas de las gotas de lluvia naturales.
- Intensidades en el rango de lluvia conocidas para la región de estudio.
- La parcela experimental de suficiente tamaño para que represente las condiciones a evaluar.
- Las características de gota y la intensidad de aplicación suficientemente uniforme sobre el área de estudio.
- La aplicación de gotas casi continua sobre el área.
- El ángulo de impacto no muy diferente de la vertical.
- Capacidad de reproducir la duración de la precipitación de interés a la intensidad deseada.
- Características satisfactorias cuando se usa en condiciones naturales tales como altas temperaturas y velocidades de viento moderadas.
- Portátil.

4.3 Tipos de simuladores de lluvia.

A partir de 1950, varios investigadores han combinado un amplio rango de técnicas y equipo para producir máquinas capaces de simular lluvia, las cuales varían desde aspersores simples hasta máquinas electrónicas que operan en forma

automática. Las mejores técnicas para producir lluvia artificial para estudios hidrológicos y de erosión, pueden ser agrupadas en dos grandes categorías:

- Aquellas que utilizan aspersores mediante los cuales se aplica el agua con cierta velocidad inducida mediante presión.
- Las que utilizan tubos pequeños en los cuales se forma la gota, y cuya velocidad inicial es cero (formadores de gota).

Simuladores tipo aspersor.

Los simuladores más sencillos del tipo aspersor son los que utilizan dispositivos como los de los sistemas de riego a presión, rehiletos y los de tipo cebolleta, estos en su mayoría de uso común y jardinería. La forma de asperjado de estos métodos es generalmente de gotas grandes a muy altas tasas de aplicación.

El diseño de simuladores de lluvia ha estado dirigido al objetivo de reproducir lo más fielmente posible las características de la precipitación natural, así, en los Estados Unidos de Norteamérica se han diseñado simuladores tipo aspersor en sus modalidades "D", "E" y "F"; este último el más comúnmente usado y se le conoce como infiltrómetro.

Las modalidades en que se presentan los infiltrómetros tipo "F" son el F' y FA; el F' utiliza una parcela de 2x4 m, la lluvia simulada es aplicada uniformemente sobre el lote y áreas vecinas mediante dos hileras de aspersores con boquillas tipo "F" montadas a lo largo de cada lado de la parcela (Figura 1); estas boquillas dirigen su flujo hacia arriba y ligeramente hacia el interior de la parcela, con intensidades de 4.5, 9.0 y 13.5 cm h⁻¹, dependiendo de cuántos juegos de boquillas sean utilizados.

Las gotas normalmente alcanzan una altura de 2 a 2.5 m sobre la superficie del lote y, por consiguiente, no alcanzan gran velocidad, pero aún así el impacto es suficiente para producir erosión a semejanza de la lluvia natural.

Los infiltrómetros tipo FA utilizan el mismo tipo de rociadores que el tipo "F", pero trabajan a presiones menores y, como consecuencia, las gotas no se elevan tan alto y la caída es menor, el tamaño del lote es de 30x75 cm; un bordo de 45 cm rodea a este lote. La intensidad de aplicación se puede variar en múltiplos de 3.8 cm h⁻¹ cerrando o abriendo los aspersores.

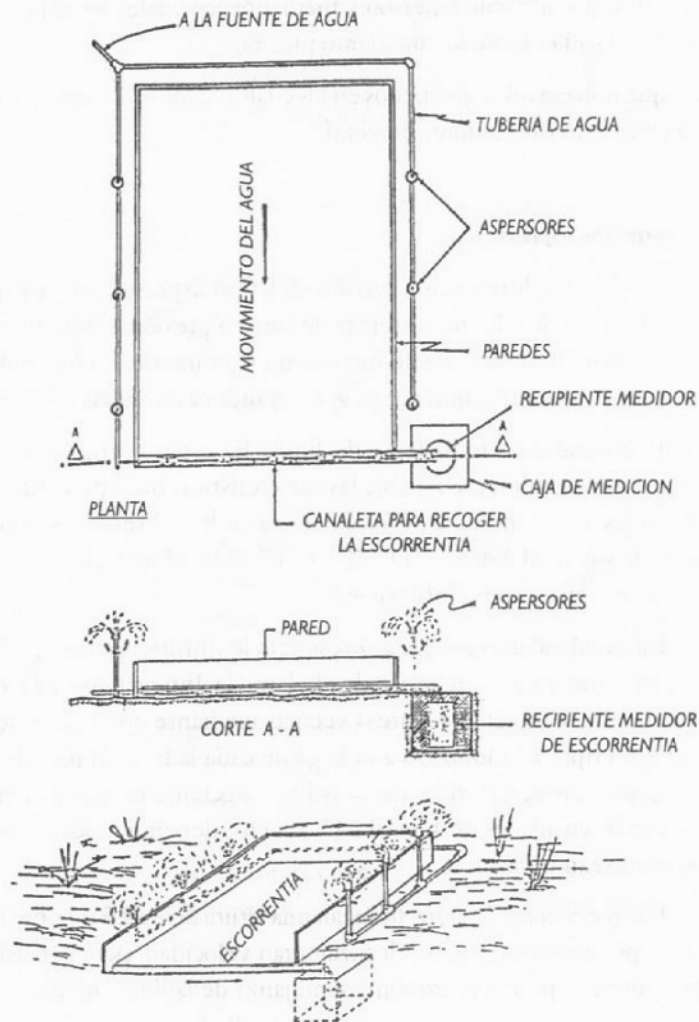


Figura 4.1. Simulador de lluvia tipo "F" (infiltrómetro).

Otro simulador de lluvia del tipo aspersor comúnmente usado en estudios de erosión es el tipo Utah, el cual trabaja a bajas presiones y utiliza un sistema de elevadores sobre la parcela, tratando de imprimir energía cinética similar a la de las condiciones naturales, el diámetro de gota promedio de este aparato es de 1.75 mm (Figura 4.2).

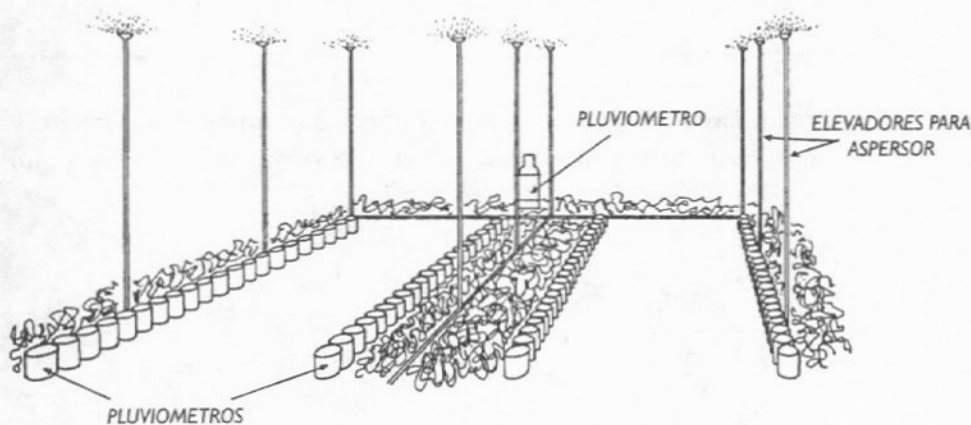


Figura 4.2. Simulador de lluvia tipo Utah.

Asseline propuso en 1977 un infiltrómetro tipo aspersor, que se distingue de la mayoría de los existentes porque la intensidad de lluvia se puede operar en el rango de 10-140 mm h⁻¹, con variaciones continuas (no discretas); esto se logra haciendo variar el ángulo de balanceo del aspersor, cuya variación se incrementa o disminuye el área asperjada, permaneciendo constante el agua utilizada. Esta relación se ilustra con los datos de la Tabla 4.1.

El aspersor que utiliza este aparato es del tipo TEE JET 5560, que está montado sobre una pequeña biela que imprime el balanceo; este dispositivo es el que comúnmente utilizan los parabrisas de algunos automóviles; la presión con que trabaja es de 0.4 bars, (Figura 4.3).

Tabla 4.1. Relación entre intensidades de precipitación, ángulo de balanceo del aspersor y superficie mojada.

Intensidad (mm h ⁻¹)	Angulo de Balanceo del Aspersor	Superficie Mojada (m ²)
37	150	14.0
45	126	11.5
60	96	10.0
90	64	7.0
120	50	5.0
140	42	3.5

Este tipo de simulador se usa comúnmente para estudios de infiltración y de escurrimiento; la parcela sobre la cual se induce la precipitación es de un metro cuadrado.

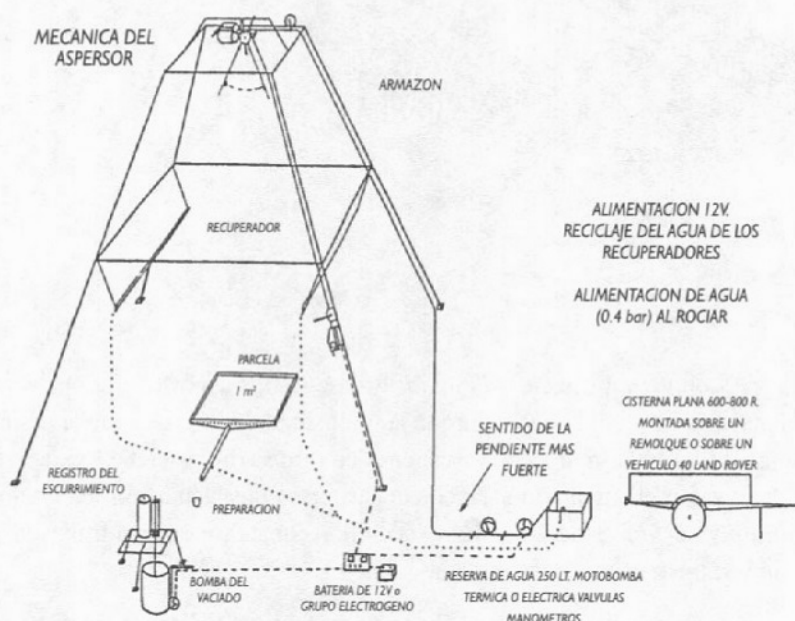


Figura 4.3. Infiltrómetro tipo aspersor, según Asseline.

En años recientes se ha venido sustituyendo el aspersor de los simuladores por dispositivos más funcionales y precisos en cuanto al objetivo de reproducir lo más fielmente posible las intensidades y diámetros de gota reales; así, se ha dado paso a las boquillas que sustituyen a los aspersores. Para esto, los simuladores que trabajan con boquillas a presión deben ser lo suficientemente capaces de transformar un patrón de aplicación tipo "chorro" a un patrón "atomizado", y que esto produzca características de gota comparables a las de la precipitación natural.

Las boquillas que se utilizan comúnmente en la agricultura para la aplicación de insecticidas u otros agroquímicos también se utilizan en sistemas de riego, y las más comunes son las tipo "A"; después de que el agua sale por el orificio, choca con una superficie deflectora, la cual hace que cambie la dirección del flujo asperjado el agua en forma de abanico; existe otra boquilla también comúnmente usada tipo "R"; ésta incorpora una cámara vértice y produce gotas más finas que las que proporciona la boquilla tipo "F", (Figura 4. 4).

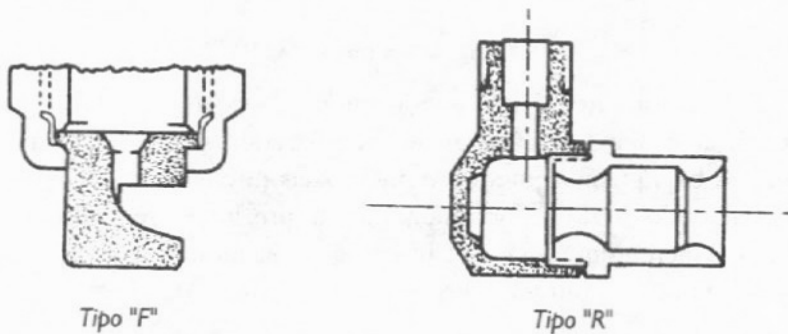


Figura 4. 4. Boquilla tipo "F" y "R"

Otro tipo de boquilla usada regularmente es el tipo "FP" (plato liso); cuando el agua sale por el orificio choca con el plato, que puede ser convexo, cóncavo o liso, dependiendo del tipo de gota deseada, (Figura 4.5).

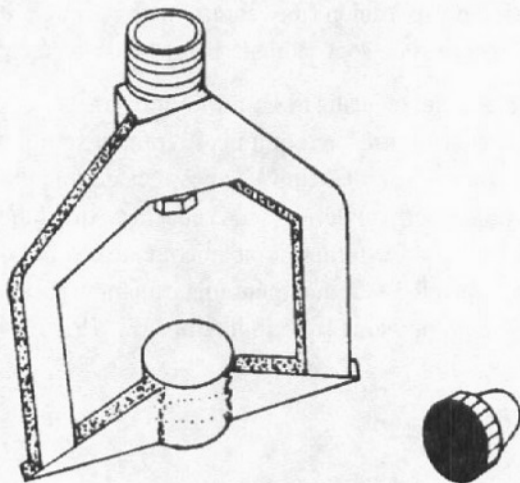


Figura 4.5. Boquilla "FP".

En la siguiente tabla se puede apreciar la variación del tamaño de gota en función de la presión y el diámetro de boquilla, además, que una boquilla "grande" operando a baja presión puede producir bajas intensidades de lluvia formando gotas demasiado grandes; incrementando la presión se reduce el tamaño de la gota pero se incrementa la tasa de aplicación; si se reduce el tamaño de la boquilla se reduce la tasa de aplicación y, por ende, el tamaño de la gota.

Tabla 4.2. Diámetro medio de gota (mm) en función de la presión y el diámetro de boquilla.

Presión (PSI)	Diámetro Nominal (mm)							
	0.8	1.9	2.6	3.8	4.6	5.3	6.1	6.5
5	0.71	0.94	1.11	1.31	1.46	1.61	1.75	1.89
10	0.63	0.86	1.03	1.22	1.37	1.52	1.66	1.79
15	0.57	0.80	0.96	1.16	1.90	1.45	1.59	1.71
20	0.52	0.75	0.91	1.10	1.24	1.35	1.53	0.63
25	0.48	0.70	0.86	1.09	1.19	1.33	1.47	1.57
30	0.49	0.65	0.81	1.00	1.14	1.27	1.42	1.52
35	0.40	0.61	0.77	0.95	1.09	1.23	1.37	1.46
40	0.37	0.57	0.73	0.91	1.05	1.18	1.32	1.42
45	0.33	0.59	0.69	0.88	1.02	1.14	1.27	1.37
50	0.30	0.50	0.66	0.84	0.98	1.10	1.23	1.32
55	0.27	0.47	0.62	0.81	0.94	1.06	1.18	1.28
60	0.23	0.43	0.59	0.78	0.91	1.02	1.14	1.24

PSI: Libras por pulgada cuadrada.

Otro simulador que utiliza boquillas en su sistema de rociado es el "*simulador de disco rotatorio*", el cual puede simular tormentas de hasta 220 mm h⁻¹.

Este dispositivo consiste de un disco de 400 mm de diámetro fabricado de aluminio de 13 mm de espesor, laminado de tal manera que forma un cono truncado con pendientes laterales de 9 por ciento aproximadamente; en el disco se cortó una sección de forma anular y alrededor de ésta se colocan dos pequeños seguros con los que se selecciona el ángulo deseado. La boquilla usada opera a 8.8 libras por pulgada cuadrada de presión, y es del tipo 1.5H30 y la descarga choca con el disco (Figura 4.6); la precipitación máxima que simula este aparato es de 220 mm h⁻¹; la altura de caída de las gotas es de 2 m y cubren un área de 30x67 cm.

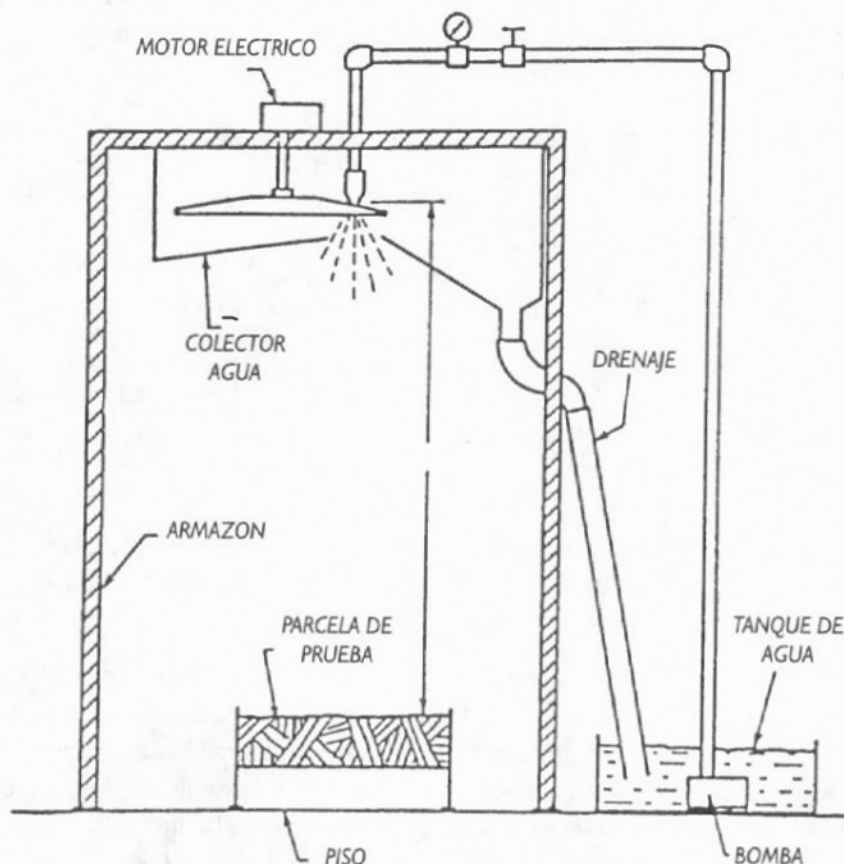


Figura 4.6. Simulador de lluvia de China *et al.*

Otro simulador de lluvia de disco rotatorio es el tipo Palouse, que se caracteriza por trabajar con bajas intensidades, duraciones largas y producir gotas pequeñas, las cuales son similares a las de tormentas naturales de intensidad de 2.5 a 10 mm h⁻¹. En este aparato se pueden variar intensidades de 6-46 mm h⁻¹ mediante el uso de un disco rotatorio ranurado, cuya rotación no tiene un gran efecto en la distribución del tamaño de gota. El tamaño medio de gota que provee

este aparato es de 1.7 mm con D_{10} de 0.8 (el 10 por ciento del volumen total de lluvia consiste en gotas de menos de 0.8 mm de diámetro) y D_{90} de 2.6 mm; la boquilla con que funciona este simulador es la "HH14WSQ Full Jet", (Figura 4.7).

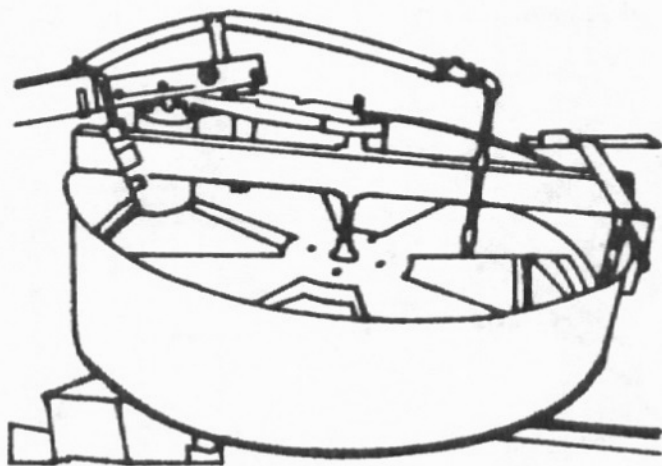


Figura 4.7. Módulo del simulador de lluvia tipo Palouse.

Los módulos del simulador son básicamente los mismos que otros de tipo rotatorio, y sólo se hicieron modificaciones como abertura más grande del colector y obturadores de abertura movable para que no interfiera con la aspersión producida.

Numerosos estudios indican que existe una relación inversa entre las tasas de aplicación y el diámetro de gota, por lo que es complicado el mantener un diámetro de gota deseado sin afectar las características de la tasa de aplicación; con fundamento en lo anterior, se han hecho modificaciones a los simuladores que utilizan boquillas inyectando aire dentro del conducto de agua para reducir las tasas de aplicación mientras se mantiene constante el diámetro de gota.

de gota se controla por la longitud del tubo o aguja, y el flujo o presión se controla por medio del diámetro o bien, por medio de módulos herméticos. El diámetro de gota que se puede esperar oscila entre 2 y 5 mm.

Puesto que las gotas de agua inician su caída con velocidad cero, los formadores de gota deberán estar localizados a una altura suficiente del suelo para que el impacto sea similar al de la velocidad real; asimismo, los tubos o agujas no deberán estar muy espaciados uno del otro para obtener distribuciones de intensidad satisfactorias; esto pone de manifiesto que los simuladores de lluvia tipo formadores de gota se utilizan en parcelas pequeñas.

Un simulador comúnmente usado, perteneciente a esta categoría, es el infiltrómetro tipo modular diseñado para estudios hidrológicos como sedimentación y erosión hídrica; un ejemplo de este simulador se muestra en la Figura 4.9.

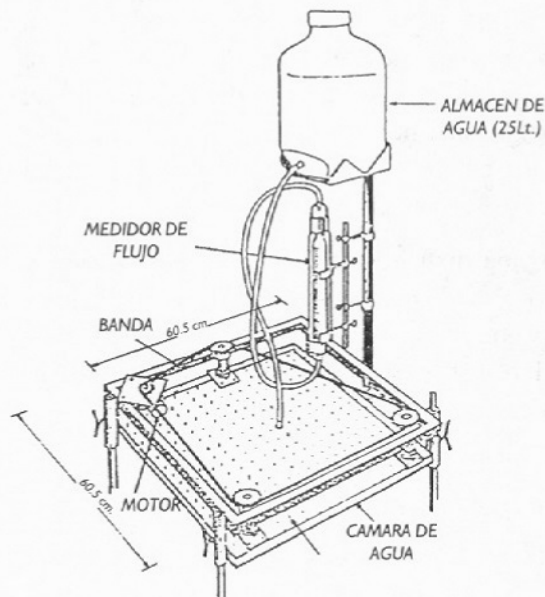


Figura 4.9. Simulador infiltrómetro modular.

Este infiltrómetro provee de intensidades de precipitación que varían de 3 a 25 cm h^{-1} sobre una parcela de 0.34 m^2 . El tamaño de gota es de 2.5 mm aproximadamente; en relación a la energía cinética de las gotas de lluvia naturales, este aparato las simula en un 28 por ciento. La cámara de agua (donde están insertadas 517 agujas hipodérmicas) es rotatoria en posición horizontal para asegurar igual presión en las agujas, las cuales son de acero inoxidable, con diámetro interior de 0.476 y 0.635 mm de diámetro exterior.

La parcela no está delimitada por un armazón, por lo que las tasas de infiltración resultan un tanto alteradas por el movimiento lateral del agua en el suelo; el aparato es portátil y se puede utilizar principalmente en pendientes pronunciadas y en suelos rocosos; además, sólo requieren de 25 litros de agua para ofrecer una intensidad de lluvia de 7.5 cm h^{-1} por 30 minutos.

Blackburn propuso un simulador de lluvia tipo infiltrómetro (el cual lleva su nombre), para medir producción de sedimentos y tasas de infiltración; este aparato es de la categoría de los formadores de gota, y su funcionamiento básico es el siguiente: el agua utilizada para la simulación de lluvia se bombea de un tanque de mil litros a un tanque elevado de 200 litros de capacidad, del cual el líquido pasa a unos filtros y medidores de flujo por acción de la gravedad antes de llegar a los módulos en los que se encuentran los formadores de gota. Estos módulos pueden alcanzar una altura sobre el suelo de 2.15 m (véase Figura 4.10).

Para tener una distribución uniforme del tamaño de gota, los módulos deberán ser nivelados; estos módulos consisten de dos láminas de plexiglass de 1.2 m por 1.2 m y de 0.6 cm de espesor, espaciadas 1.27 cm. Cada uno de estos módulos tiene 2,209 formadores de gota de acero inoxidable, con diámetro interior de 0.04 cm. Las intensidades de lluvia que pueden ser simuladas con este aparato son del orden de 5 a 83 mm h^{-1}

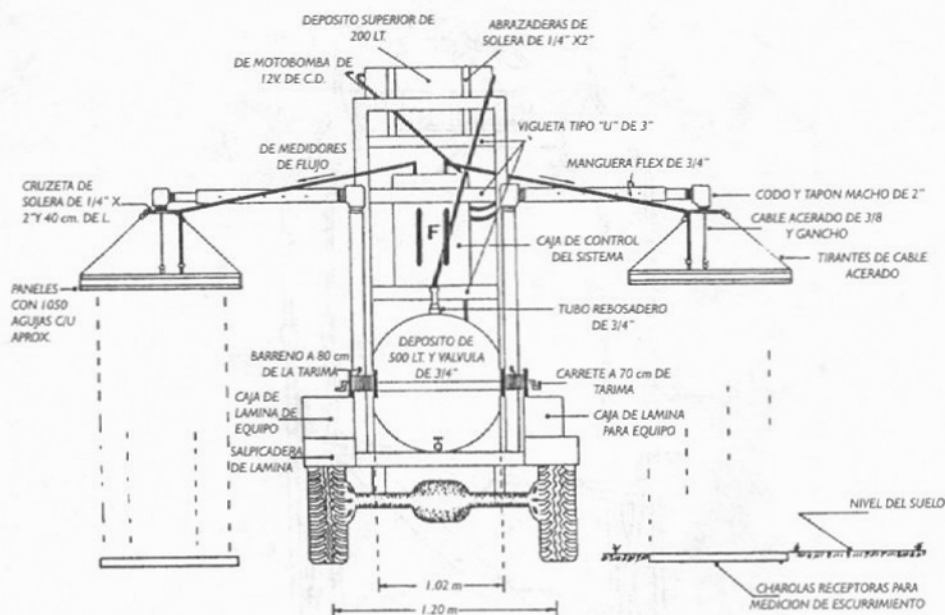


Figura 4.10. Vista frontal general del infiltrómetro Blackburn.

Existen simuladores de lluvia apropiados para terrenos irregulares (hasta pendientes del 60 por ciento), y para estudios de erosión e infiltración; estos aparatos pertenecen a la categoría de los formadores de gota, y se les denomina "tipo Tahoe"; su sistema de abasto es de 827 tubos de polietileno (Figura 4.11). El diámetro de gota que produce este simulador es de 3.2 mm, con caída máxima de 2.5 m; la parcela de estudio tiene dimensiones de 0.61 x 0.61 m, el tanque de abasto es de 20 litros. Una característica importante de este simulador es que se puede variar la altura de caída así como también la inclinación del aparato mediante el ajuste de sus soportes inferiores.

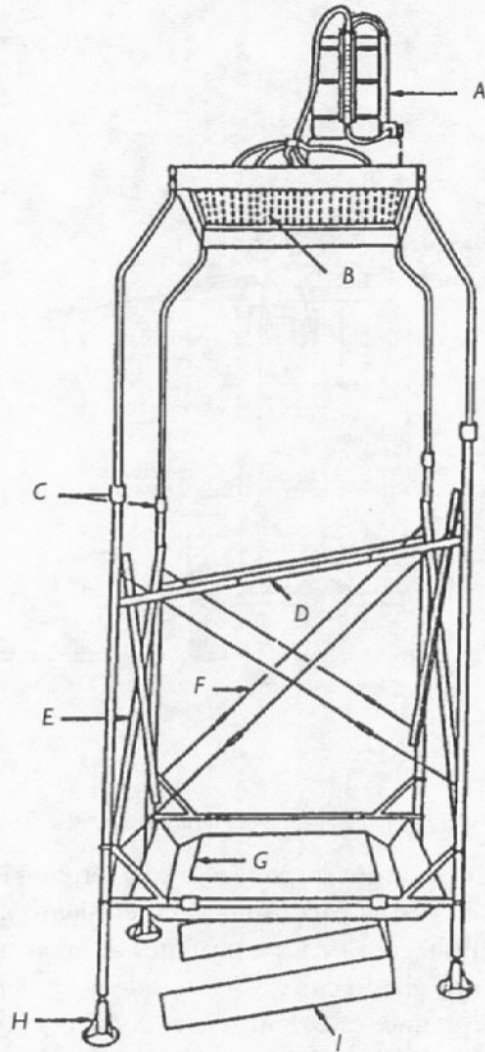


Figura 4.11. Esquema del simulador de lluvia tipo Tahoe: a) Tanque de almacenamiento, b) Panel de agujas, c) Brazos ajustables, d) Brazos laterales, e) Soportes, f) Alambres ajustables, g) Placa contenedora, h) Soportes ajustables, i) Charola perimetral.

4.4 Comentarios Finales.

Debido a que los problemas severos de erosión se han asociado con precipitaciones pluviales de alta intensidad, la mayoría de los simuladores de lluvia han sido diseñados para cumplir esta condición sin considerar la variabilidad de este parámetro en la región de estudio; esto es de suma importancia antes de aceptar el concepto universal de simuladores de lluvia, ya que la mayor parte de la pérdida de un suelo por erosión hídrica puede estar relacionada a precipitaciones de baja intensidad y larga duración.

La velocidad de impacto, el tamaño de gota y la intensidad son características interdependientes de una manera muy compleja. La revisión de literatura indica que esta interacción es muy variable en y entre tormentas así como en el espacio. Los simuladores de lluvia existentes no consideran la naturaleza dinámica de los procesos de la precipitación o sus interacciones; por ejemplo, la reducción de la intensidad en la mayoría de los simuladores se controla mediante la reducción del tiempo promedio de asperjado o por la reducción del número de dosificadores (aspersores, boquillas, agujas, etc.). La intensidad es, por lo tanto, reducida a través de la intermitencia o por la reducción de la aplicación, por lo que sólo se reduce la velocidad de impacto y no la distribución del tamaño de gota.

En los simuladores de lluvia (en cualquier modalidad) es de primordial importancia el considerar la altura o velocidad de caída de la gota de agua, ya que esto constituye un parámetro básico en los estudios de erosión y de hidrología, por lo que la distancia de caída requerida para que ésta se aproxime al impacto real de una gota sobre el suelo depende del tamaño de la gota (Tabla 4.5).

Tabla 4.5. Velocidad de caída de las gotas de agua (ms^{-1}).

Diámetro de gota (mm)	Altura de Caída (m)							
	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	8.0	20.0 terminal
1.5	3.64	4.50	4.99	5.25	5.39	5.47	5.51	5.51
2.0	3.83	4.92	5.55	5.91	6.15	6.30	6.35	6.58
2.5	3.98	5.19	5.89	6.39	6.67	6.92	7.22	7.91
3.0	4.09	5.37	6.14	6.68	7.08	7.37	7.75	8.06
3.5	4.15	5.52	6.35	6.95	7.90	7.73	8.15	8.52
4.0	4.21	5.63	6.52	7.17	7.65	8.00	8.46	8.86
4.5	4.24	5.72	6.66	7.36	7.85	8.21	8.70	9.10
5.0	4.27	5.79	6.77	7.50	8.00	8.36	8.86	9.25
5.5	4.29	5.85	6.86	7.61	8.11	8.47	8.97	9.30
6.0	9.31	5.90	6.94	7.69	8.30	8.55	9.01	9.30

En la tabla anterior se puede apreciar que existe una relación directa entre el diámetro de gota y la altura requerida para que la velocidad de caída se aproxime a la real, así, mientras más pequeña sea la gota requiere de una altura de caída mayor para que su velocidad se aproxime a la velocidad real; como ya se estableció, este parámetro es importante de considerar en la elección y/o diseño de simuladores de lluvia.

Los simuladores tipo aspersor ofrecen altas tasas de aplicación con gotas grandes (características de las precipitaciones torrenciales de zonas áridas); mientras que las boquillas simulan de manera más acertada la precipitación debido a que asperjan hacia arriba u horizontalmente para reducir la intensidad de aplicación; su velocidad de impacto es más baja que la normal, el diámetro de gota es directamente proporcional al diámetro del orificio e inversamente proporcional a la presión.

Los simuladores tipo aspersor dejan mucho que desear desde el punto de vista de la velocidad de caída, ángulo de impacto y distribución del tamaño de gota, así como la distribución de la intensidad, inferencia del viento, presentando también la desventaja de la intermitencia prolongada, siendo acuerdo su uso para áreas grandes.

Los simuladores que operan bajo el principio de formación de gota presentan mayores tasas de uniformidad en tamaño, dado que ésta se controla con la longitud del tubo, el cual es de sección hidráulica constante; la distribución de la intensidad también es más alta que la de simuladores tipo aspersor, siendo controlada por la separación entre tubos y por la carga hidráulica seleccionada; en general, su uso se restringe a parcelas de dimensiones pequeñas (1.5 m^2) y para estudios de erosión y escurrimiento.

En las Tablas 4.6 y 4.7 aparece un listado en el que se señalan los diversos tipos de simuladores existentes y sus características principales de funcionamiento; esta información es de suma utilidad en aquellos casos en que se desea seleccionar un tipo de simulador en función del objetivo de la investigación.

Tabla 4.6. Simuladores de lluvia que utilizan boquillas en un sistema de asperjado.

Simuladores de Lluvia (localidad)	Boquilla	Presión (PSI)	Mov., de boquilla y Patrón de Asperjado	Diámetro de gota (mm)			Intensidad (mm hr ⁻¹)	Tamaño Parcela (mXm)
				D ₁₀	D ₅₀	D ₉₀		
USDA-SEA-ARS, La Fayette Indiana	80100 VEEJET	6.08	LATERAL INTERMITENTE	1.0	2.1	3.0	64-127	4 X 11.5
USDA-SEA-ARS, Wadsworth Georgia.	80100 VEEJET	6.08	LATERAL INTERMITENTE	1.0	2.1	3.0	64-127	4 X 11.5
USDA-SEA-ARS, Morris, Minnesota	80100 VEEJET	6.08	LATERAL INTERMITENTE	1.0	2.1	3.0	64-127	4 X 11.5
UNIVERSIDAD DE ILLINOIS, Urbana, Illinois	80100 VEEJET	6.08	LATERAL INTERMITENTE	1.0	2.1	3.0	64-127	4 X 11.5
DEPT. DE PRIM. IND. TOOWOOPA Queensland, Australia	80100 VEEJET	6.08	LATERAL INTERMITENTE	1.0	2.2	3.2	30-230	4 X 22.5
SIMULADOR MODIFICADO UNIV. ESTATAL NVO. MEXICO Las Cruces, Nvo. Mexico	80100 VEEJET	6.08	LATERAL INTERMITENTE	1.0	2.1	3.0	101-203	5.0 X 6.5
SIMULADOR USDA-SEAR-ARS, La Fayette, Indiana	80100 VEEJET 80130 VEEJET	6.08	LATERAL OSCILATORIO	1.0 1.1	2.1 2.5	3.2 4.2	2-127	4 X 11.5

continuación...

Simuladores de Lluvia (localidad)	Boquilla	Presión (PSI)	Mov., de boquilla y Patrón de Asperjado	Diámetro de gota (mm)			Intensidad (mm hr ⁻¹)	Tamaño Parcela (mXm)
				D10	D50	D90		
BOMBA ROTATORIA USDA-SEA-ARS Lincoln, Nebraska	80100 VEEJET	6.08	ROTATORIO INTERMITENTE	1.0	2.1	3.0	64-127	4 X 11.0
BOMBA ROTATORIA USDA-SEA-ARS, Ames, Iowa	80100 VEEJET	6.08	ROTATORIO INTERMITENTE	1.0	2.1	3.0	64-127	4 X 11.0
LABORATORIO SIMULADOR, UNIVERSIDAD WISCONSIN, Madison, Wisconsin	80100 VEEJET	6.08	OSCILATORIO INTERMITENTE	1.0	2.1	3.0	38	1 X 5
LABORATORIO SIMULADOR, USDA-SEA-ARS La Fayette, Indiana	80100 VEEJET	6.08	OSCILATORIO INTERMITENTE	1.0	2.1	3.0	38	0.7 X 3.3
INTER-RILL USDA-SEA-ARS, Oxford, Mississippi	80100 VEEJET 80150 VEEJET	6.08	OSCILATORIO INTERMITENTE	0.7 1.1	1.6 2.5	3.2 4.2	10-127	0.7 X 0.9
INTER-RILL MICHIGAN TECH UNIV. HOUGHTON Honok Michigan	80100 VEEJET 80150	6.08	OSCILATORIO INTERMITENTE	0.7 1.1	1.6 2.5	3.2 4.2	10-127	0.7 X 0.9
AUSTRALIA	8070 VEEJET	6.08	LATERAL INTERMITENTE					4.6 X 4.6

continuación...

Simuladores de Lluvia (localidad)	Boquilla	Presión (PSI)	Mov., de boquilla y Patrón de Asperjado	Diámetro de gota (mm)			Intensidad (mm hr ⁻¹)	Tamaño Parcela (mXm)
				D10	D50	D90		
ESTACION PALOUSE USDA-SEA-ARS Pullman, Washington			ESTACIONARIO CONTINUO				2.2000	2.6 X 13.1
INFILTROMETRO PALOUSE UNIV. DE IDAHO Moscow, Idaho	14W59 FULLJET	6.08	ESTACIONARIO INTERMITENTE	0.8	1.7	2.6	1.50	2 X 2
ASPELOR PURDUE PURDUE UNIV. La Fayette, Indiana	7 LA 5 B 5 D	6.08	ESTACIONARIO CONTINUO	0.1 0.1 0.1	1.2 0.8 0.6	2.4 1.5 1.5	119 64 82	1.2 X 1.2
PURDUE MODI- FICADO, UNIV. DE WISCONSIN Madison, Wisconsin	7 LA	6.08	ESTACIONARIO INTERMITENTE	0.1	1.2	2.4	2.111	-
PURDUE MO- DIFICADO, USDA- SEA-ARS Tucson, Arizona	7 LA	6.08	ESTACIONARIO CONTINUO	0.1	1.2	2.4	119	1.0 X 1.0
PURDUE MODIFICADO, UNIV. DE MISSOURI, Columbia, Missouri	7 LA	6.08	ESTACIONARIO INTERMITENTE	0.1	1.2	2.4	2.111	-
PURDUE MODIFICADO USDA- SEA-ARS Columbia Missouri	7 LA	6.08	ESTACIONARIO INTERMITENTE	0.1	1.2	2.4	2.111	-

continuación...

Simuladores de Lluvia (localidad)	Boquilla	Presión (PSI)	Mov., de boquilla y Patrón de Asperjado	Diámetro de gota (mm)			Intensidad (mm hr ⁻¹)	Tamaño Parcela (m.Xm)
				D10	D50	D90		
INFILTROMETRO DE INTENSIDAD VARIABLE. UNIV. HEBREA REHOVOT, Israel	7 LA	6.08	ESTACIONARIO INTERMITENTE	0.1	1.2	2.4	2.111	1.2 X 1.2
RFER, UNIVER-SIDAD ESTATAL DE COLORADO, Fort Collins, Colorado	RAIN JET 78 C	27.2	ESTACIONARIO INTERMITENTE	0.5	1.2	3.0	12-100	-
UNIVERSIDAD DE DAKOTA DEL NORTE, Mandan, Dakota Del Norte	RAIN JET 78 C	27.2	ESTACIONARIO CONTINUO	0.7	1.4	2.8	36-58	13 X 26
USGS, LAKEWOOD, Colorado	RAIN JET 78 C	27.2	ESTACIONARIO CONTINUO	0.6	1.4	2.8	50	-
USGS, Denver Colorado	RAIN JET 78 C	27.2	ESTACIONARIO CONTINUO	0.6	1.4	2.8	50	-
USGS USDA-SEA-ARS, Tucson, Arizona	RAIN JET 78 C	27.2	ESTACIONARIO CONTINUO	0.6	1.4	2.8	50	-
USGS USDA-SEA-ARS, Sidney, Montana	RAIN JET 78 C	28.98	ESTACIONARIO CONTINUO	0.7	1.5	2.4	64	-
SIMULADOR DE DISCO ROTATORIO ESTACION DE INVESTIGACION PARA LA EROSION DEL SUELO Emek, Israel	SPRAYING SYSTEMS 1HH12 FULL JET 1.5H30	8.4	ESTACIONARIO INTERMITENTE	-	-	-	9.74 15-143	1.0 X 1.5

continuación...

Simuladores de Lluvia (localidad)	Boquilla	Presión (PSI)	Mov., de boquilla y Patrón de Asperjado	Diámetro de gota (mm)			Intensidad (mm hr ⁻¹)	Tamaño Parcela (m.Xm)
				D ₁₀	D ₅₀	D ₉₀		
SIMULADOR DE DISCO ROTATORIO UNIVERSIDAD DE ARIZONA, Tucson Arizona,	SPRAYING SYSTEMS 1.5 H30 FULL JET	8.4	ESTACIONARIO INTERMITENTE	-	-	-	17-20	1.5 X 1.5
TIPO MORIN Y GOLD BERG. CENTRO DE INVESTIGACION PARA LA CONSERVACION DEL SUELO, Gunnedah, Australia	SPRAYING SYSTEMS 1.5 H30 FULL JET	9.8	ESTACIONARIO INTERMITENTE	1.9	2.6	4.3	58-115	1.0 X 1.5
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGRONO-MICAS WAITE, South, Australia	SPRAYING SYSTEMS 1.5 H30 FULL JET SPRAYING SYSTEMS	9.66	ESTACIONARIO INTERMITENTE	-	2.4	-	10-150	1.0 X 1.0
UNIVERSIDAD DE CORNELL, Ithaca, N.Y.	7309 FLAT TEE JET 8015 FLAT TEE JET	19.18-38.5	ROTATORIO INTERMITENTE	-	-	-	17-282	-
SIMULADOR PORTAVIL, COMMONWEALTH Atherton, Australia	ROSE SPRAY HEAD	-	LATERAL INTERMITENTE	-	1.3	-	80	2.0 X 3.3

continuación...

Simuladores de Lluvia (localidad)	Boquilla	Presión (PSI)	Mov., de boquilla y Patrón de Asperjado	Diámetro de gota (mm)			Intensidad (mm hr ⁻¹)	Tamaño Parcela (mXm)
				D ₁₀	D ₅₀	D ₉₀		
RAINTOWER USDA SEA-ARS Manhattan, Kansas	SPRAYING SYSTEMS 14WSQY 35WSQ	-	ESTACIONARIO CONTINUO	1.0	2.1	3.9	18	1.5 X 3.1
SIMULADOR LABORATORIO UNIVERSIDAD DE Salford, Lancashire, U.k.	CHILDS (PVC)	45	ESTACIONARIO	-	-	-	0-300	6.2 X 4.1
OAK RIDE NATIONAL LABORATORIO, OA Tridge, Tennessee	BETA FOG SRN303	-	ESTACIONARIO CONTINUO	.04	-	1.2	5-27	1.0 X 1.0
INFILTROMETRO TIPO F, USDA - SEA -ARS, Belts Ville, Maryland.	TIPO F	27.02- 34.72	ESTACIONARIO CONTINUO	-	-	-	46-64	2.0 X 3.9
INFILTROMETRO ROCKY MOUNTAIN USDA-FOREST SERVICE, Ft. Colorado	TIPO F	19.32- 28.84	ESTACIONARIO CONTINUO	-	-	-	127	0.3 X 0.8
UNFILTROMETRO INTER MOUNTAIN USDA-FOREST SERVICE, Ogden, Utah	TIPO F	33.74	ESTACIONARIO CONTINUO	-	-	-	25-152	0.6 X 1.8

continuación...

Simuladores de Lluvia (localidad)	Formador de Gota	Distancia de Caída (m)	Tamaño de gota (mm)	Intensidad (mm hr ⁻¹)	Tamaño Parcela (mXm) O (m ²)
INFILTROMETRO MOVIL UNIV. DE WYOMING Laramie Wyoming	HILOS	2.6	-	25-152	0.6 X 0.6
INFILTROMETRO PORTATIL UNIV. ESTATAL IOWA, Ames, Iowa	TUBOS CAPILARES DE VIDRIO	1.0	5.6	101	CIRCULAR 0.017
LAB. SIMULADOR, UNIV. DE MAINE, Orono Maine.	TUBOS DE ACERO	7.2	3.2 5.1	38-50	CIRCULAR 1.33
LABORATORIO SIMULADOR UNIV. ILLINOIS Illinois, Urbana	TUBOS DE POLIETILENO	2.7	3.2	19.33	12.0 X 12.0
SIMULADOR DE BAJA INTENSIDAD, UNIV. INST. DE AGRONOMIA Rehovet, Israel	TUBOS DE ACERO	-	2.8	6	0.5 X 0.5
SIMULADOR FOR-MADOR DE GOTA UNIV. DE ILLINOIS, Urbana, Illinois	AGUJAS HIPODERMICAS, TUBOS DE POLIETILENO, TUBOS DE ACERO	8.9	2.2 3.4 4.9	10-70 45-350 100-525	1.3 X 1.3
INFILTROMETRO MOVIL UNIV. TEXAS Est. Exp. Texas	TUBOS DE ACERO	2.3	2.5	5-250	1.0 X 1.0

continuación...

Simuladores de Lluvia (localidad)	Formador de Gota	Distancia de Caída (m)	Tamaño de gota (mm)	Intensidad (mm hr ⁻¹)	Tamaño Parcela (mXm) O (m ²)
LABORATORIO SIMULADOR UNIV. DE PURDUE, La Fayette, Indiana	TUBOS DE POLIETILENO	2.6	2.7	13-200	4.6 X 4.6
LABORATORIO SIMULADOR, USDA-SEA-ARS, Oxford Mississippi	AGUJAS HIPODERMICAS	6.7	VARIABLE	1-250	CIRCULAR 0.45
SIMULADOR TIPO TAHOE UNIV. DE CALIFORNIA Davis, Calif.	TUBOS DE POLIETILENO	2.5	3.2	76-250	0.6 X 0.6
LABORATORIO SIMULADOR CSIRO DIV. DE SUELOS Camberra, Australia	AGUJAS HIPODERMICAS	12.3	2.5 5.1	20-250	0.6 X 3.0
LABORATORIO SIMULADOR UNIV. ESTATAL DE UTAH Logan, Utah	TUBOS DE LATON	5.0	4.5	25-787	9.8 X 9.8
SIMULADOR PORTATIL UNIV. ESTATAL DE UTAH Logan, Utah	AGUJAS HIPODERMICAS	1.6	2.5	38-250	0.6 X 0.6
INFILTROMETRO DE GOTA USDA-SEA-ARS, Coshocton, Ohio	AGUJAS HIPODERMICAS	2.6	VARIABLE	5-102	1.0 X 2.0
LABORATORIO SIMULADOR UNIV. NEBRASKA Lincoln, Nebraska	VARAS DE PLASTICO	11.3	5.1	20-120	CIRCULAR 0.005

continuación...

Simuladores de Lluvia (localidad)	Formador de Gota	Distancia de Caída (m)	Tamaño de gota (mm)	Intensidad (mm hr ⁻¹)	Tamaño Parcela (mXm) O (m ²)
LABORATORIO SIMULADOR USDA-SEA-ARS, Fort Collins, Colorado	TUBOS DE TEFLON	3.0	3.6	76-203	1.2 X 1.2
LABORATORIO SIMULADOR UNIV. ESTATAL FORESTAL, Syracuse N.Y.	TUBOS DE POLIETILENO	1.0	3.2	19-33	0.7 X 0.7
LABORATORIO SIMULADOR UNIV. ESTATAL FORESTAL, Syracuse, N.Y.	TUBOS DE POLIETILENO	1.0	3.2	19-33	2.0 X 2.0
LABORATORIO SIMULADOR UNIV. ESTATAL DE GHENT, Ghent, Bélgica	TUBOS DE COBRE	2.8	VARIABLE	4.7-64.5	-
LABORATORIO SIMULADOR CSIRO, Camberra, Australia	AGUJAS HIPODERMICAS TUBOS DE PLASTICO	11.2	3.8 5.1	0-300	1.0 X 1.0
LAB. SIMULADOR Uganda	-	6.0	3.2 6.2	50-152	-
SIMULADOR PORTATIL, Nueva Zelanda	ALAMBRES	-	-	200-300	CIRCULAR 0.015

Referencias Bibliográficas

- Asenave, C. et al, 1979. Simulation de pluie sur bassins versants representatifs. Cah. Orstom Ser. Hydrol, Vol. XIX N° 4.
- Asseline, J. y C. Valentin. 1977. Construction et mise au point d'un infiltrometre a aspersion. Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer. Centre D'Adiopoboune-Côte Divoire. France .
- Blackburn, R.O. y C.M. Skaw. 1974. A mobile infiltrometer for use on Rangeland. Journal of Range Management Technical. Notes 27 (4).
- Brock, J.H. et al. 1982. Infiltration and sediment production on a deep hardland range site in North Central Texas. Journal of Range Management. 35 (2) March.
- Bubbenzer, G.D. et al. 1985. Low intensity rainfall with a rotating disk simulator. Transaction of American Society of Agricultural Engineers. Vol. 28(9): July-August.
- China, S.S. et al. 1985. The Effect of Soil Air Entrapment on Soil Erosion during simulated rainfall. Transaction of American Society of Agricultural Engineers. Vol. 28(5): September- October.
- Collinette, J. y C. Valentin. 1979. Analyse des différents facteurs intervenant sur l'hydrodynamique superficielle. Cah. Orstom. Sér. Péd. Vol. XII. N° 4, France.
- Department of Agriculture, U. S. A. 1979. Proceedings of The rainfall simulator workshop, Tucson, Arizona.
- Hart, G. E. 1984. Erosion from simulated rainfall on mountain rangeland in Utah, Journal of Soil and Water Conservation. Vol. 39 (5): September-October.
- Kenneth, H.S. 1985. Drop Size Distributions for Irrigation Spray Nozzles. Transaction of American Society of Agricultural Engineers. Vol. 28(6): November-December.
- Meewing, R.O. 1969. Infiltration and Soil Erosion as Influenced by Vegetation and Soil in Northern Utah. Technical Notes of Intermountain Forest and range Experiment. Station Forest Service USDA. Ogden, Utah.
- Munn, J.R. y G.L. Huntington. 1976. A portable rainfall simulator for erodibility and infiltration measurements on rugged terrain. Soil Science. A.N. J., Vol. 40.
- Rauzi, F. y F.M. Smith. 1973. Infiltration rates: three soils with three grazing levels in Northeasten Colorado. Journal of range management. 26(2). March.

- Rojas, M. 1977. Simuladores de lluvia. Centro Interamericano para el Desarrollo Integral de Aguas y Tierras (CIDIAT). Mérida, Venezuela.
- Sánchez C., I. 1986. Cosecha de agua de lluvia "in situ" una alternativa para zonas de escaso y errático régimen pluvial. Tema didáctico N° 7 de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, Delegación Laguna, Gómez Palacio, Dgo.
- Sánchez B., C. 1984. Effects of livestock grazing and exclusion on infiltration and sediment yields for different range sites on El Plateado watershed, Zacatecas, México. Dissertation for the Ph.D. New México State University. Las Cruces, New México.
- Schults, A.R. *et al.* 1985. Detachment and splash of a cohesive soil by rainfall. Transaction of American Society of Agricultural Engineers, Vol. 28 (6): November-December.
- Shelton, C.H. *et al.* 1985. A continuous-application rainfall simulator. Transaction of American Society of Agricultural Engineers, Vol. 28(4): July-August.
- Velazco H., A. 1983. Uso y manejo del suelo. Ed. Limus pp. 124-125.
- Velázquez M., A. 1985. Influencia del pastoreo sobre la infiltración y producción de sedimentos en diferentes comunidades vegetales en el cañon de Juchipila. Informe técnico de actividades SARH-INIA. CIANOC.

Capítulo V

**ANÁLISIS DE INFORMACIÓN
EN ESTUDIOS CON
SIMULADORES DE LLUVIA**

Jean Asseline

Jeffrey J. Stone

Ignacio Sánchez Cohen

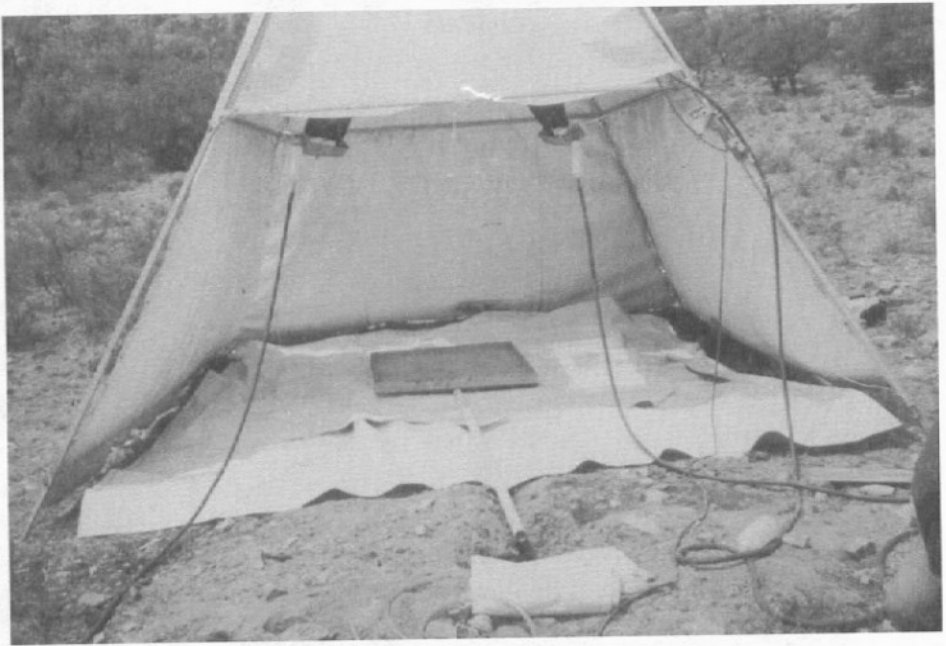
Esteban Gutiérrez Ronquillo

5.1 Introducción.

Existen diferentes maneras de procesamiento de los datos que se generan en las pruebas con simuladores de lluvia, los cuales se adecuan en función del objetivo de las mismas y que incluye variables de erosión, escurrimiento e infiltración; en general, estas variables son interdependientes; por ejemplo, el escurrimiento es función de la pendiente, infiltración, cubierta vegetal, etc. En el presente Capítulo se describe el procedimiento de análisis de la información que se obtiene con dos tipos de simuladores de lluvia: rotatorio, el cual es utilizado para estudios de erosión y tipo Asseline- Valentine comúnmente usado para estudios comparativos de tasas de infiltración.

5.2 Análisis de información.

Es necesario en toda prueba la calibración del aparato, especialmente en la intensidad de lluvia deseada, algunos simuladores tienen dispositivos para tal efecto y en algunos otros se regula mediante el espaciamiento de los inyectores o aspersores. En los simuladores pequeños la calibración consiste en cubrir la parcela con plástico o con una lona impermeable; luego se pone a funcionar el aparato y se mide el escurrimiento; así, conociendo el volumen escurrido el área colectora y el tiempo de funcionamiento se determina la intensidad de aplicación.



Calibración del simulador de lluvia tipo Asseline-Valentin.

Información necesaria.

Antes de la prueba:

- Propiedades físicas del suelo (textura, estructura, etc.)
- Cobertura vegetal
- Pendiente
- Contenido de humedad del suelo
- Temperatura

Durante la prueba

- Tiempo de inicio de la prueba
- Tiempo en que las depresiones se comienzan a llenar
- Tiempo en que se inicia el movimiento de agua y empieza el almacenamiento superficial
- Esguimiento en función del tiempo

- Tiempo en que se cesa la lluvia
- Tiempo en que cesa la escorrentía
- Tiempo en que se infiltra el agua en las depresiones

Tabla 5.1 Ejemplos de Formato para levantamiento de datos en pruebas con simuladores de lluvia tipo Rotatorio.

Fecha: _____ Sitio: _____ Parcela: _____ Prue: _____ Pendiente: _____
 Intensidad Promedio: _____ Duración _____
 Pulgadas por hora: _____ Aplicación: _____
 Suelo: _____

Cubierta: Ninguna

Tiempo		Escurrimiento		Infiltración	Observaciones
Min.4	At. Seg.	Pies ³	Pulg h ⁻¹	Pulg h ⁻¹	
Antes de iniciar la prueba la temperatura del aire era 17 °C, la del suelo 15.5 y la del agua 14.9 °C					
0:00					Inicio
2:30					Movimiento del agua en la parcela
3:00		0.000	0.00		Inicio del escurrimiento
3:31			0.31		
4:03	63	0.66			Muestreo No.1
4:13			0.53		
4:22	19	0.11			Contenido de Humedad
4:40			0.85		0-6" a 2 - 8%
4:57	35	0.200			Humedad equivalente
5:11			1.03		0 - 6 a 14-8%
5:26	29	0.300			0 - 1 a 1.38%
5:40			1.11		1 - 4 a 2.89
5:53	27	0.400			4 - 12 a 3.37
6:05			1.20		Muestra #2 (6:00)
6:10	25	0.500			

...Continuación			
6:30			1.30
6:41	23	0.600	
6:51			1.43
7:02	21	0.700	
7:12			1.43
7:23	21	0.800	
7:33			1.43
7:44	21	0.900	
7:54			1.50
8:04	20	1.000	Muestra #3 (8:00)
...			
...			
29:33			2.13
30:00	53 ^{1/2}	9.530	2.13
30:09			2.00
30:18	18	9.65	
30:28			1.58
30:37	19	9.750	
30:53			0.94
31:09	32	9.850	
31:44			0.21
32:20	71	9.900	0.00
33:50		0.00	

Muestra #3 (8:00)

Muestra #8 (30:00)

Fin de la prueba

Cese del escurrimiento

Temperaturas:

Almacenamiento en
DepresionesAire 16.6 C
Suelos 13.8 C
Agua 15.0 C

Profundidad de penetración al final de la prueba

...El muestreo se realiza en secuencia continua.

La principal ventaja del uso de simuladores de lluvia para el estudio de comportamiento hidrodinámico de los suelos es que se pueden controlar las intensidades, duraciones y frecuencias de precipitación. Una variable más que es

añadida a esta caracterización es el contenido antecedente de humedad del suelo, el cual es de gran importancia en el tiempo de inicio del escurrimiento.

5.3 Análisis de una prueba con simulador tipo rotatorio.

Para hacer mediciones de escurrimiento, como se asienta en el capítulo III, se coloca un medidor de flujo en la parte baja de las parcelas, en donde se concentra el escurrimiento, el cual consiste en una entrada divergente, una garganta que es en donde se mide la altura del flujo, y una salida que desagua el medidor. Cada uno de los medidores de flujo es calibrado para cuantificar la cantidad de agua en la salida y la altura de ésta en el vertedor. La relación entre carga o altura (H) y el gasto (Q) se expresa como:

$$Q = a H^b \quad (1)$$

La altura H es medida a intervalos regulares, siendo más frecuente al inicio de la prueba. Es en este período que se realizan muestreos para cuantificar los sólidos en suspensión. La Tabla 5.1 muestra datos obtenidos en campo con un simulador tipo rotatorio.

Concentración de sedimentos.

La concentración de sedimentos (C) como porcentaje con respecto al peso de agua se calcula como:

$$C = \frac{Y}{A} * 100 \quad (2)$$

Donde Y es el peso de los sedimentos producidos y A es el peso del agua en la muestra.

Caudal de salida:

El caudal de salida se obtiene mediante la siguiente expresión para obtener los resultados en mm h⁻¹:

$$Q = [(aH^b) / A_p] * 3600 \quad (3)$$

Donde A_p es el área de la parcela en m², resultando Q en mm hr⁻¹

Escurrimiento:

Para la obtención del caudal en mm se estima primero el incremento en tiempo (hr) entre un punto de lectura y el siguiente. Posteriormente se multiplica por el promedio de salida en el caudal entre el punto a estimar y e inmediato anterior como sigue:

$$Q_i = (T_i - T_{i-1}) * (Q_i + Q_{i-1}) \quad (4)$$

Caudal acumulado:

$$Q_{acum_i} = Q_{acum_{i-1}} + Q_i \quad (5)$$

Sedimentos:

Esta variable correlaciona el manejo de la parcela con la respuesta en término de erosión como función de una intensidad de lluvia de la siguiente manera:

$$Q_s = \left(\frac{Y}{A} Q * 1000\right) / 3600 \quad (6)$$

Para la estimación del peso de los sedimentos expresado en gramos en el intervalo, se procede de la siguiente manera:

$$Y_i = (T_i - T_{i-1})(Q_{si} + Q_{si+1}) * 30 \quad (7)$$

Q_{si} y Q_{si+1} están expresados en mm h^{-1} y t_i , t_{i-1} en horas.

5.4 Síntesis de Información.

En la Tabla 5.2 se muestran los resultados de campo obtenidos. Mediante la matriz de correlación entre las variables de estudio con las características de las parcelas se obtiene información la cual es indicativa del tipo de manejo que se deberá realizar para garantizar la permanencia o no de las variables de decisión.

Tabla 5.2 Evaluación hidrológica de una parcela experimental bajo condiciones de humedad a capacidad de campo.

	Tiempo (min)	Altura (ft)	Tara Bote (gr)	Peso Total (gr)	Peso Seco (gr)	Concent. (%P>Total)	Q mm hr ⁻¹	Q (mm)	Q acum. (mm)	Q sedim. (gr s ⁻¹)	Sedim. (gr)	Sedim. Acum. (gr)
	0.00	0.00										
Inicio Q	3.50	0.010				0.10	2.00	0.06	0.06	0.02	1.95	1.95
246	5.00	0.037	53.79	933.8	57.13	0.38	14.88	0.21	0.27	0.51	23.83	25.78
238	6.00	0.050	44.86	814.0	47.27	0.31	23.61	0.32	0.59	0.67	35.40	61.18
237	6.50	0.060	49.83	821.1	52.03	0.29	31.23	0.23	0.82	0.81	22.11	83.30
245	7.50	0.055	53.42	845.6	56.06	0.33	27.33	0.49	1.31	0.82	48.87	132.16
242	8.50	0.063	53.89	780.8	54.80	0.13	33.65	0.51	1.81	0.38	36.12	168.28
248	9.50	0.060	50.27	836.3	54.78	0.58	31.23	0.54	2.36	1.62	60.14	228.42
	10.50	0.080					48.54	0.66	3.02	0.00	48.73	277.15
	11.50	0.080					48.54	0.81	3.83	0.00	0.00	277.15
	12.33	0.076					44.87	0.65	4.48	0.00	0.00	277.15
	13.60	0.080					48.54	0.99	5.46	0.00	0.00	277.15
	15.00	0.076					44.87	1.09	6.55	0.00	0.00	277.15
	18.00	0.84					52.31	2.43	8.98	0.00	0.00	277.15
	19.75	0.082					50.42	1.50	10.48	0.00	0.00	277.15
	21.55	0.080					48.54	1.48	11.97	0.00	0.00	277.15
	25.00	0.070					39.56	2.53	14.50	0.00	0.00	277.15
	26.00	0.068					37.84	0.64	15.14	0.00	0.00	277.15
	27.75	0.075					43.97	1.19	16.34	0.00	0.00	277.15
	30.00	0.073					42.18	1.62	17.95	0.00	0.00	277.15
	30.50	0.069					38.69	0.34	18.29	0.00	0.00	277.15
	31.00	0.058					29.65	0.28	18.57	0.00	0.00	277.15
	31.50	0.050					23.61	0.22	18.80	0.00	0.00	277.15
	32.00	0.014					17.42	0.17	18.97	0.00	0.00	277.15
	32.50	0.029					10.24	0.12	19.08	0.00	0.00	277.15
	33.50	0.019					5.36	0.13	19.21	0.00	0.00	277.15
Total de Escurrimiento (mm)			19.21				Total de Sedimentos (kg ha ⁻¹)	85.41				
Pico de Escurrimiento (mm hr ⁻¹)			52.31				Total de Sedimentos (ton ha ⁻¹)	0.09				

Tabla 5.3 Matriz de variables en estudio.

	Escurrecimiento Pico	Escurrecimiento	Sedimentos
Gramíneas	Negativo	Negativo	Negativo *
Herbáceas	Negativo *	Negativo	Positivo
Arbustos	Negativo	Negativo	Negativo
Denudados	Positivo *	Positivo *	Positivo *
Suelo	Positivo *	Positivo *	Positivo *
Mantillo	Negativo *	Negativo *	Negativo *
Base	Positivo	Positivo	Positivo
Rugosidad	Negativo *	Negativo *	Negativo
Roca	Positivo	Positivo	Positivo *
Pendiente	Positivo	Positivo	Positivo *

*Coeficiente de correlación mayor a 0.5

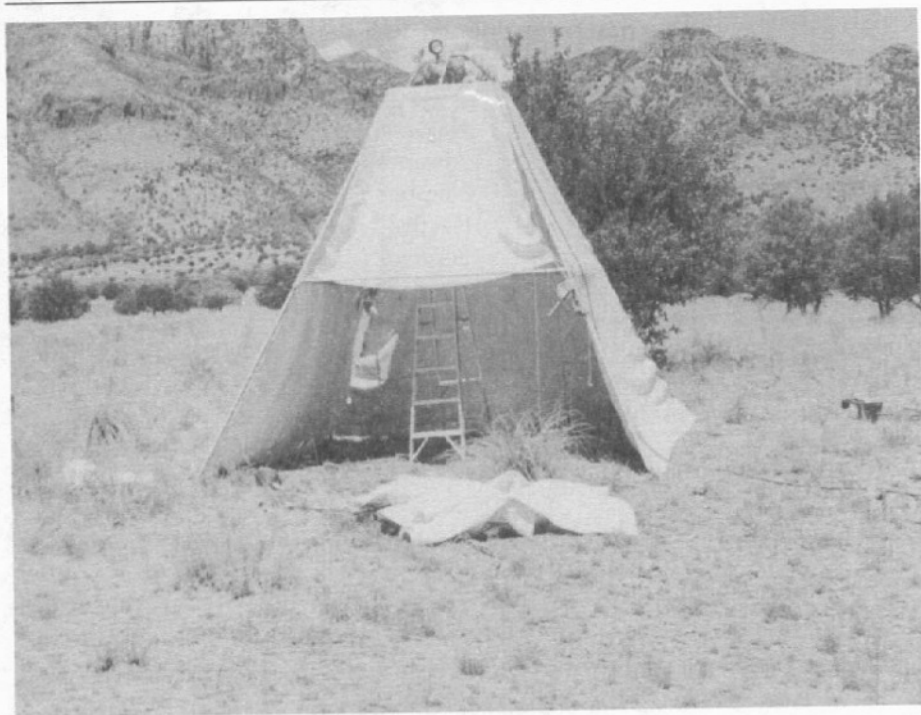
5.5 Análisis de una prueba con un simulador tipo Asseline-Valentin.

Los mini-simuladores de lluvia (tipo Orstom-Asseline-Valentin) fueron diseñados para permitir simular lluvias de intensidades predeterminadas (conocidas y reguladas) sobre una superficie cuadrada de aproximadamente 4 m², en cuyo centro está instalada una parcela de un metro cuadrado, ubicada en el sentido de la pendiente. La parcela presenta en su parte inferior un pequeño canal que recibe el agua no infiltrada en el suelo, que es recuperada por gravedad y constituye el escurrimiento.

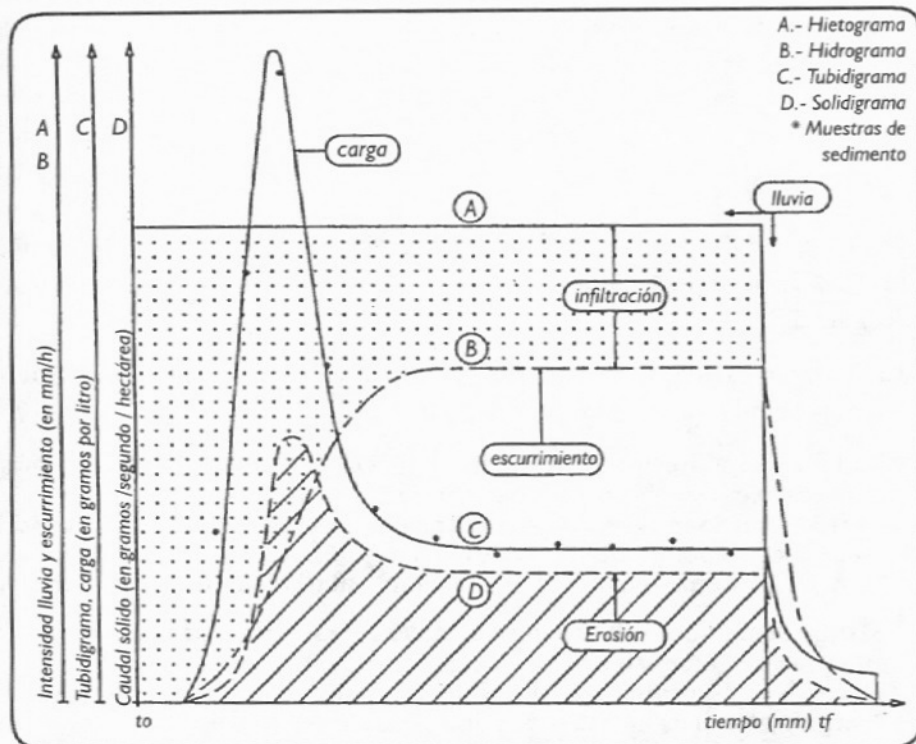
La cantidad de escurrimiento se mide:

- De manera continua con la ayuda de un limnógrafo, o
- De manera discontinua tomando cada minuto muestras con una probeta, (tiempo- volumen)

Conociendo la intensidad de la lluvia y la del escurrimiento se puede obtener, por diferencia, la infiltración del agua en el suelo a cada momento.



Simulador de lluvia Aseline-Valentin.



5.1 Diagrama teórico de una lluvia simulada según Lafforgue y Collinet.

En el diagrama anterior se pueden observar los siguientes elementos:

- La lluvia representada por el hietograma (A).
- El escurrimiento representado por el hidrograma (B).
- Conociendo la lluvia y el escurrimiento se puede calcular, por diferencia, la infiltración (zona con puntos).
- Durante el escurrimiento se toman muestras del agua para determinar la carga de materia sólida (C) que sale de la parcela, concentración que se expresa en gramos por litro.
- Multiplicando esta carga por el caudal del hidrograma (milímetros por hora transformados en litros por minuto, y dado que un milímetro de agua en un metro cuadrado es igual a un litro), se obtiene el solidigrama (D), que representa

el peso total del suelo que sale de la parcela, lo que impide la integración del factor longitud de la pendiente, pero este dato constituye una buena información sobre la susceptibilidad del suelo a la erosión.

5.6 Cálculo de Parámetros.

Considerando solamente la lluvia y el escurrimiento, y analizando de más cerca los gráficos, se pueden destacar varios elementos e informaciones a partir de la Figura 5.2.

Las reacciones de un suelo sometido a una lluvia de intensidad constante se pueden descomponer en cuatro fases:

1. La fase de imbibición: desde el principio de la lluvia (t_0) hasta un cierto tiempo (t_i), no se observa escurrimiento. Al inicio de este período, la infiltración es total y la intensidad de la infiltración superior a la de la lluvia. Después, a medida que el suelo se humecta, se forman charcos (D_m) disminuyendo la capacidad de infiltración.
2. Al cabo de un tiempo (t_i) aparece el inicio del escurrimiento, primeramente en forma de goteo y luego va creciendo para formar un chorro. Conforme aumenta el escurrimiento, disminuye la intensidad de la infiltración. Se llama régimen transitorio a la fase que va desde el principio del escurrimiento (t_i) hasta el inicio de la estabilidad del caudal (t_m).
3. La fase del régimen permanente que va del (t_m) al (t_u).

Con una lluvia suficientemente larga o en un suelo bien húmedo llega un momento en que el escurrimiento presenta una cierta regularidad. Esta estabilidad del régimen proporciona dos datos esenciales:

- El R_x o intensidad máxima del escurrimiento y
- El F_n o intensidad mínima de la infiltración.

4. La fase de vacío que va desde el tiempo de fin de la lluvia (t_0) hasta el fin del sorteo o el fin del encharcamiento (t_f).

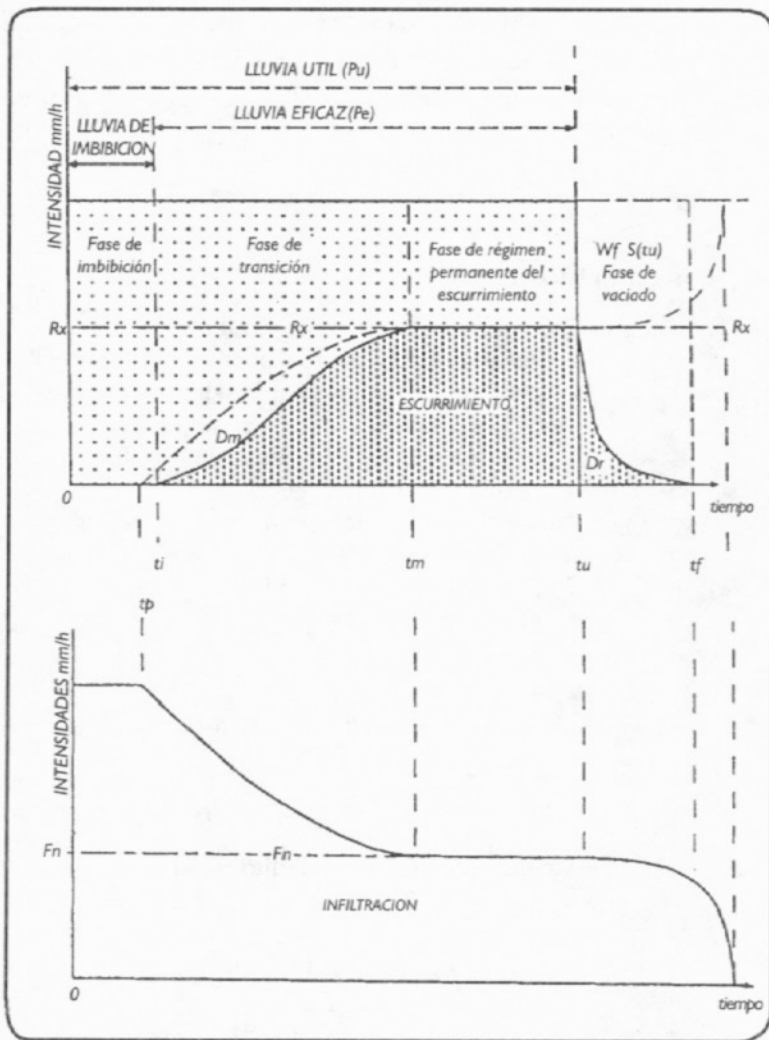


Figura 5.2 Escurrimiento e infiltración bajo intensidad de lluvia constante (Lafforgue).

A cada cambio de intensidad de lluvia también cambia este régimen permanente. Las intensidades de escurrimiento e infiltración van a variar hasta encontrar un nuevo equilibrio.

Alcanzar la fase de vacío que va desde el de fin de lluvia (t_u) hasta el fin del goteo o del fin del encharcamiento (t_f), el último de los dos.

A cada frase corresponde una ecuación de balance entre los diferentes parámetros medidos en un instante dado.

5.7 Códigos usados (símbolos).

Dm (mm)	Detención superficial movilizable
Dr (mm)	Detención superficial recuperable = fracción del escurrimiento medido después del fin de la lluvia
F(t) (mm h ⁻¹)	Intensidad de la infiltración en un tiempo dado
F _n (mm h ⁻¹)	Intensidad mínima de infiltración = I - R _x
I (mm h ⁻¹)	Intensidad de la lluvia
II (mm h ⁻¹)	Intensidad límite del escurrimiento = abscisa al inicio de la recta Roc [I]
IK	Índice de estado de humedad del suelo
K _{ru} (%):	Coefficiente de escurrimiento útil

$$K_{ru} = \frac{L_r + D_r}{P_u} * 100$$

K_{re} (%): Coeficiente de escurrimiento eficaz

$$K_{re} = \frac{L_r + D_r}{P_e} * 100$$

K_{Rx} (%): Coeficiente de escurrimiento eficaz

$$K_{Rx} = \frac{R_x}{I} * 100$$

Li (mm): Lámina infiltrada = P_u - (L_r + D_r)

W (mm):	Lámina infiltrada (se usa tanto W como Li)
Lr (mm):	Lámina escurrida
Pe (mm):	Lluvia eficaz = $P_u - P_i$
Pi (mm):	Lluvia de embibición = $P_u - P_e$, o $I^* t_i$
Pu (mm):	Lluvia útil = $I^* t_i$
R (mm h ⁻¹):	Intensidad del escurrimiento
Rx (mm h ⁻¹):	Intensidad máxima del escurrimiento
S(mm):	Lámina almacenada en la superficie
SLi (mm):	Lámina infiltrada acumulada ΣL_i
SLr (mm):	Lámina escurrida acumulada ΣL_r
Sp (mm):	Lámina útil acumulada
t (min):	Tiempo
ta (días y fracciones de días):	Tiempo de descanso entre la lluvia considerada y la inmediatamente anterior
ti (min,s):	Tiempo al inicio del escurrimiento
tm (min):	Tiempo en el que se empieza el régimen permanente; este tiempo es difícil de establecer con precisión pues depende de la apreciación individual y por lo tanto subjetiva.
tu (min):	Tiempo al final de la lluvia
tf (min):	Tiempo al final del escurrimiento

Ecuación de una lluvia.

La ecuación del conjunto de los fenómenos que constituyen una lluvia es la siguiente:

$$P_u(t) - L_r(t) - L_i(t) - D_m(t) - S(t) = 0$$

Durante la fase de imbibición:

$$L_r(T) = 0; D_m(t) = 0$$

$$P_u(t) - L_i(t) - S(t) = 0$$

En régimen transitorio:

$$I - R(t) - F(t) - (d D_m / dt) - (ds / dt) = 0$$

En régimen permanente:

$$\begin{aligned} R(t) &= R_x; & F(t) &= F_n; & (d D_m / dt) &= 0 \\ (dS / dt) &= 0; & I - R_x - F_n &= 0 \end{aligned}$$

En fase de vacío:

$$P_u = 0$$

$$Lr(tf) - Lr(tu) = Dm(tu) + S(tu) - S(tf) + Li(tu) - Li(tf)$$

Si llamamos D_r a la lámina de agua que se recupera después de suspendida la lluvia, se puede escribir:

$$D_r = Dm(tu) + S(tu) - S(tf) - Li(tf)$$

5.8 Comentarios finales.

No existe un procedimiento específico para el análisis de información con simuladores de lluvia. Sin embargo, el análisis básico consiste en interpretar el hidrograma en función de las características de la parcela pues será el indicativo del impacto de prácticas de manejo como función del contenido de humedad antecedente y la intensidad de la precipitación

La parametrización de modelos de infiltración con representatividad física es deseable en aras de que los resultados sean un indicativo de las características hidrodinámicas de los suelos en otras entidades diferentes a las ensayadas.

El problema de escala constituye uno de los paradigmas que la hidrología moderna enfrenta, por lo que se hace necesario complementar los estudios con simulación de lluvia con observaciones a diferentes escalas con lluvias naturales, es decir, la implementación de lotes de escurrimiento (usualmente de 10m x 30 m) en los que se mida los caudales que se presentan como consecuencia de las variables anteriormente anotadas. Así también es necesario el instrumentar pequeñas cuencas en donde el área de escurrimiento sean perfectamente conocidas y sus características físico-biótico sean estudiadas.

Estos estudios son la base para el uso de modelos de simulación hidrológicos que consideran parámetros distribuidos. En la medida que los parámetros de estos algoritmos sean fundamentados en mediciones en campo,

los resultados serán más confiables pudiendo constituir una plataforma técnica confiable para la toma de decisiones.

Referencias Bibliográficas

- Asseline J., E. Custode , G. De Non , A. López , C. López , G. Trujillo , y M. Viennot 1993. La simulación de Lluvia. Metodología y Prácticas. ORSTOM. Ministerio de Agricultura y Ganadería. Dirección Nacional Agrícola, Francia. 66 pp.
- Gutiérrez, R. G. 1999. Evaluación del Efecto de la Cubierta Vegetal en el Escurrimiento, Pico de Escurrimiento y Arrastre de Sedimentos bajo dos Intensidades de Luvia Simulada. Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Chihuahua. 93 pp.
- Simanton R., M. Weltz, H. Larsen, J. Stone, D. Page, B. Freitas, W. Tuggle, Ch. Christiansen, R. Van Der Zweep, G. Eagleton, A. Dolphin, J. Smith, W. Rice, and C. Leet. 1989. USDA ARS. Water Erosion Prediction Project. Rangeland field Studies. Handout for WEPP Core Team Meeting 53 pp.

Capítulo VI

ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS PARA LA MODELACIÓN DEL ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL Y EROSIÓN HÍDRICA

Rodolfo Jasso Ibarra
Ignacio Sánchez Cohen
Jeffrey J. Stone
Alicia Melgoza Castillo
J. Roger Simanton
Juan Guillermo Martínez Rodríguez

6.1 Introducción.

La reducción en la productividad agrícola es un problema ampliamente reconocido a nivel mundial, nacional y local que está directamente relacionado con la pérdida de suelo al ocurrir los eventos lluviosos y de escurrimiento superficial. Los factores que propician este fenómeno están asociados con las características hidrodinámicas del suelo superficial, pendiente del terreno, densidad de la vegetación, prácticas de control y la cantidad e intensidad de la precipitación. Una estimación global de la pérdida de suelo indica que anualmente se pierden aproximadamente 33 billones de toneladas de suelo en 3.5 billones de hectáreas, de las cuales el 90 por ciento corresponden a pastizales. A nivel nacional, se estima que la tasa de erosión hídrica y eólica alcanza las 2.75 toneladas de suelo por hectárea-año en promedio, sobre 159 millones de hectáreas. Este nivel de erosión del suelo se sitúa como el principal problema limitante en la producción de maíz y frijol, cultivos dominantes en la agricultura de subsistencia en México.

La tecnología para el control de la erosión hídrica del suelo se basa en modificaciones en las condiciones de superficie que permitan incrementar la resistencia de las partículas a ser disgregadas y arrastradas por las corrientes de flujo superficial. La implementación de un programa de control de la erosión es una decisión que depende de la magnitud del proceso y la rentabilidad del sistema de producción para amortiguar las inversiones que ello implique. Actualmente

existen diversos procedimientos para cuantificar la tasa de pérdida de suelo que varían desde mediciones simples en sitios muy localizados, hasta técnicas de modelación espacial del proceso con la ayuda de programas computacionales de simulación ambiental y de percepción remota del estado de superficie.

Numerosos reportes científicos enfatizan las ventajas de los modelos de simulación con respecto al trabajo de campo en el estudio de procesos ambientales en general y del balance hidrológico en particular. Los modelos de simulación ambiental permiten a los tomadores de decisiones optimizar estrategias de manejo de los recursos naturales, mientras que a los investigadores les permite establecer las relaciones funcionales entre las variables y las respuestas que determinan los patrones de comportamiento de los sistemas hidrológicos en estudio. En los ambientes semiáridos la tecnología para el manejo de los recursos hidrológicos está fuertemente orientada hacia la predicción de la disponibilidad del recurso considerando su cantidad y calidad tanto en el espacio como en el tiempo. Los modelos de simulación hidrológica permiten desarrollar estas tareas para un gran número de aplicaciones en las que se requiere una representación de los procesos que ocurren en los sitios de generación y en los de concentración del escurrimiento como resultado en los cambios en el uso del suelo.

En años recientes se ha popularizado el uso de modelos de simulación como el CREAMS (Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems), SWRRB (Simulator of Water Resources in Rural Basins), SWAT (Soil and Water Assessment Tool) y EPIC (Erosion/Productivity Impact Calculator), entre otros. Los modelos anteriores incorporan en sus rutinas de procesos hidrológicos la simulación del escurrimiento superficial utilizando el método de la Curva Numérica y de la tasa de erosión utilizando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo. Su parametrización requiere de la estimación de algunos parámetros relacionados con las características hidrodinámicas del suelo y del estado de superficie.

El presente trabajo está enfocado hacia dos objetivos; uno es describir la estructura de los modelos de simulación del escurrimiento superficial y de la tasa de erosión hídrica de Curva Numérica y la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, respectivamente, y el otro es desarrollar el procedimiento de parametrización de dichos modelos a partir de pruebas de simulación de lluvia. Para ello se utilizan datos experimentales generados en el proyecto de colaboración binacional entre el CENID RASPA (INIFAP, México) y el ARS (USDA, Estados

Unidos) durante 1996 y 1997 en el estado de Chihuahua.

6.2 Naturaleza del proceso erosivo.

La erosión hídrica del suelo ocurre en dos fases que son la disgregación de partículas por efecto del impacto de las gotas de lluvia y su transporte desde un punto de mayor elevación a uno de menor, que pueden ser dentro de la misma área de escurrimiento o hacia un arroyo. La energía con que las gotas de lluvia actúan sobre la superficie depende de la intensidad de precipitación, y ésta a su vez del tamaño (peso) de la misma. Una intensidad de lluvia de 10 mm h^{-1} resulta en un flujo de energía de 0.0439 W m^{-2} ; al incrementar la intensidad a 100 mm h^{-1} (factor de 10), el flujo de energía se incrementa a 0.664 W m^{-2} (factor de 15) con lo que se demuestra que la erosividad de la lluvia se incrementa exponencialmente con la intensidad de la misma.

El proceso de disgregación de partículas debido al impacto de las gotas de lluvia ocurre principalmente cuando el suelo está seco; el movimiento de suelo produce superficies menos abruptas haciendo que las micro-depresiones tiendan a sellarse. Este es un factor que incide en la reducción de la conductividad hidráulica del suelo en un evento lluvioso. Una vez que la intensidad de precipitación excede la capacidad del suelo para absorber agua, el gradiente de elevación hace que la fracción excedente fluya sobre la superficie a una velocidad que depende de la cantidad excedente, la pendiente y rugosidad del terreno. Al integrar este proceso denominado Flujo Hortoniano en un área de escurrimiento determinada, se obtiene el gasto que se produce en dicha área. Aunque existen otros procesos que producen el escurrimiento superficial, el flujo Hortoniano es el que más domina en la mayoría de los ambientes naturales.

El escurrimiento superficial produce una fuerza erosiva que causa el arrastre de partículas de suelo, las cuales pueden ser depositadas sobre la superficie rellenando pequeñas depresiones antes de alcanzar el cauce de un arroyo o bien, ser depositadas en el lecho de éste o en el plano de inundación adyacente a la ruta de desagüe. Lo anterior ocurre si la cantidad de material en suspensión excede la capacidad de transporte de sedimentos del agua. Por el contrario, si dicho nivel no es alcanzado, el flujo superficial ejercerá una fuerza de separación de partículas iniciando la formación de cárcavas. La capacidad de saturación del agua depende del régimen de flujo y de la distribución del tamaño de partículas en suspensión. El grado con que estos factores afectan el proceso erosivo depende

de la escala espacial de un análisis determinado. Este tema no será descrito en este documento; el lector puede referirse a algunas referencias específicas sobre el particular.

6.3 Modelación de la pérdida de suelo.

El conocimiento actual acerca de la dinámica de los procesos relacionados con la pérdida de suelo se ha desarrollado a diferentes niveles de análisis tanto a escala local como a escalas regional y global. Los procesos locales se han estudiado tan detalladamente, que el conocimiento derivado se ha integrado en modelos de simulación. Los modelos de simulación hidrológica son representaciones matemáticas del flujo de agua y sus constituyentes como compuestos disueltos y partículas de suelo en suspensión sobre la continuidad suelo-planta-atmósfera cuya capacidad y confiabilidad dependen tanto de la estructura del modelo como de la exactitud en su parametrización.

6.3.1 Generalidades sobre simulación hidrológica.

La construcción y aplicación de modelos de simulación es un proceso recurrente que se inicia en las *observaciones* del mundo real que crean la necesidad de resolver o entender un problema. La *base de datos* de dichas observaciones se divide en dos fracciones; una para la *construcción* del modelo y la otra para su *validación*. Al plantear el problema bajo estudio se trata de incorporar todas las fuentes de variación de una *variable respuesta* de interés; la asociación de estas fuentes de variación o variables independientes dentro de una expresión numérica o ecuación es la *formulación* del modelo. Este proceso requiere múltiples revisiones en las que pueden realizarse algunos *ajustes*, cuando el investigador decide detener el proceso de ajustes al modelo se llevan a cabo pruebas con datos ficticios pero dentro de un *rango lógico*. De hecho, las primeras corridas de un modelo se realizan con un ejemplo real, las corridas subsecuentes se realizarán modificando cada parámetro en proporciones constantes (10, 20, 30 por ciento menos y más que los datos iniciales) para *identificar* los *parámetros* que tienen mayor y menor impacto sobre los resultados que produce el modelo; este proceso se conoce como *análisis de sensibilidad*. Una vez identificados los parámetros más importantes se procede al desarrollo de la base de datos con la que se correrá el modelo, *especificando* los valores de variables que se pueden medir sobre el objeto de estudio, por ejemplo la pendiente del terreno, área, longitud de un arroyo, etc. Los parámetros que no

se pueden medir en el terreno se deberán *estimar* con la mayor exactitud posible utilizando diferentes series de datos y evaluando el error en la variable de interés, esta etapa corresponde a la *calibración* del modelo.

La etapa de *validación* consiste en la comparación de valores generados por el modelo con valores observados en la realidad, el grupo de datos en esta etapa debe ser diferente al usado en la construcción del modelo. Si el error obtenido es mayor al máximo permitido, se deberá *ajustar* nuevamente antes de llevarlo a su aplicación con fines de pronóstico o como fundamento en la toma de decisiones sobre el manejo de los recursos naturales. Una vez que se ejecuta una acción basada en los resultados de un modelo de simulación se evalúa el comportamiento del sistema y esto conducirá a nuevos planteamientos y el ciclo se reanuda.

En términos simples, un modelo de simulación es una herramienta para la prueba de hipótesis cuantitativas que tiene los siguientes atributos:

1. Una base matemática que ayuda al entendimiento cuantitativo de las respuestas hidrológicas de una cuenca dado un patrón de manejo y la variabilidad natural de las variables ambientales.
2. Un modelo facilita inferir tendencias en áreas donde faltan datos y conocimiento.
3. La modelación puede simular nuevas ideas y métodos experimentales.
4. Los modelos pueden dar lugar a una reducción en la cantidad de experimentos, permitiendo el diseño de aquellos que respondan preguntas particulares y discrimine hipótesis alternativas.
5. Comparados con los métodos tradicionales, los modelos hacen un mejor uso de los datos, los cuales se están obteniendo de manera más exacta pero a más costo.
6. La información sobre diversos aspectos del manejo de los recursos naturales se analiza en forma conjunta entre varios especialistas, dando un panorama unificado y proporcionando un estímulo valioso a la colaboración y trabajo de grupo.
7. Un modelo con frecuencia proporciona un resumen de datos conveniente.
8. Los modelos pueden dar un método de interpolación, extrapolación y

predicción.

9. Un buen modelo se puede usar para sugerir prioridades de investigación aplicada y de desarrollo, así como para apoyar la toma de decisiones.

6.3.2 Tipos de modelos de simulación.

Los esfuerzos de modelación de la erosión hídrica han permitido a los especialistas en la materia desarrollar tres tipos de estructuras de modelo: Empíricos locales, Empíricos de amplia aplicación y Físicamente basados, con amplio rango de aplicación. En todos los casos la tecnología de teledetección y de análisis georreferenciado (sistemas de información geográfica) permite inferencias de amplia cobertura espacial y temporal.

El método de la curva sedimento-gasto representa los modelos empíricos locales que relacionan la concentración de sedimentos con el caudal superficial ya sea en forma lineal o no lineal. Un ejemplo de este tipo de estructura de modelo es:

$$C_s = a Q^b \quad (1)$$

Donde C_s y Q son la concentración de sedimentos a un tiempo dado en el que el flujo superficial está representado por Q ; a y b son parámetros de regresión lineal que representan la concentración de sedimentos para una magnitud de flujo unitario y la sensibilidad del sistema a producir sedimentos respectivamente. La producción de sedimentos total en un evento lluvioso o un período de tiempo determinado resulta de integrar el producto de C_s y Q en el tiempo. Una forma más directa de la expresión anterior relaciona el flujo de sedimentos (Q_s) con el flujo superficial. En un análisis del flujo de cuatro arroyos en La India se reportan valores del coeficiente a de 0.24 a 8.08 mientras que del exponente b , de 1.12 a 1.54 con coeficientes de determinación entre 0.60 y 0.90 considerando de 17 a 44 pares de observaciones. Aunque rápido y de bajo costo, este procedimiento tiene la limitante de poderse aplicar sólo en el ambiente donde fueron generados los parámetros y bajo un manejo estable del área de escurrimiento y del arroyo.

Los factores que inciden en el proceso erosivo se pueden clasificar como ambientales y de manejo. Los factores ambientales incluyen la cantidad e intensidad de la precipitación. La capacidad de almacenamiento de agua del suelo en conjunción con las características de la precipitación determinan tanto

el volumen de agua que fluye sobre la superficie como su variabilidad en el tiempo. Ambas variables constituyen la fuerza erosiva que actúa sobre la superficie del suelo que presenta una resistencia a la erosión en función de su granulometría, agregación, densidad de la cubierta vegetal, inclinación y longitud del flujo superficial. Los factores de manejo pueden ser aquellas prácticas de prevención y control de la erosión (terrazas, siembra en contorno, etc.) o bien, el efecto de la intensidad de pastoreo sobre la estructura de la vegetación (composición y densidad).

El análisis exhaustivo de los factores anteriores condujo a la formulación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo. Una modificación posterior a su formulación fue incorporada en modelos de simulación hidrológica de amplio uso tales como el SWAT (Soil and Water Assessment Tool) y el EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator). La ecuación universal de pérdida de suelo modificada permite estimar la tasa de pérdida de suelo por evento lluvioso a partir de datos de escurrimiento superficial tales como volumen escurrido y caudal máximo. Los factores relacionados con las características del suelo, topografía y manejo permanecen de igual manera como en la versión original. Dicha ecuación expresa:

$$Y = 11.8(Q Q_p)^{0.56} (K)(C) (P) (LS) \quad (2)$$

Donde Y=Tasa de erosión del suelo ($t \text{ ha}^{-1}$), Q=Volumen escurrido (mm), Q_p =Escurrecimiento máximo (mm h^{-1}), K=Factor de erodabilidad del suelo, C=Factor de cobertura vegetal, P=Factor de prácticas de control de la erosión del suelo, y LS=Factor de longitud e inclinación de la pendiente. Las variables Q y Q_p sustituyen al factor de erosividad de la lluvia en la versión original de esta ecuación y permiten estimaciones para cada evento lluvioso. La modelación de estos parámetros se describe más adelante.

Una de las grandes ventajas de este modelo es que se puede parametrizar por medio de sistemas de información geográfica para facilitar el análisis espacial del proceso así como para evaluar el impacto de cambios en el manejo de la cuenca. La disponibilidad de información de campo en nuestro país y de los procedimientos para su parametrización dentro de un esquema de análisis georeferenciado hacen de esta estrategia la más viable para el estudio y planeación

del control de la erosión hídrica en áreas agrícolas y de pastizal en México.

Otra metodología de modelación de la erosión hídrica la constituyen los modelos físicamente basados tales como el WEPP (Water Erosion Prediction Project), desarrollado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. Esta metodología busca representar las variables que inciden en el proceso de desprendimiento y arrastre de suelo en base al cumplimiento de las leyes de la conservación de la materia y la energía. El área de escurrimiento es subdividido en una cuadrícula o sub-cuencas en las cuales el volumen infiltrado se substraer de la lluvia, la lluvia excedente es ruteada en base a las ecuaciones de Saint Venant. Por su parte, la capacidad de transporte de sedimentos se calcula con las ecuaciones de Meyer-Peter y Muller. El gran volumen de datos que se requiere para aplicar esta metodología en cuencas grandes representa el mayor obstáculo para su desarrollo. Sin embargo, se prevee que esta tecnología desplazará en el futuro a la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo.

6.3.3 Escurrimiento superficial (Q).

El método más ampliamente difundido a nivel mundial para estimar las características del escurrimiento superficial es el desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos, conocido como Método de la Curva Numérica. Este método establece una relación constante entre la retención relativa y el escurrimiento relativo. Un valor relativo es el cociente entre valores actuales y potenciales ya sea de la retención o del escurrimiento. La Ecuación 3 describe mejor esta relación.

$$\frac{F}{S} = \frac{Q}{P^*} \quad (3)$$

Donde F y S representan la retención actual y potencial respectivamente; Q y P* son el escurrimiento superficial actual y potencial respectivamente, todas en mm. El valor de F resulta al sustraer el escurrimiento superficial actual (Q) y las abstracciones iniciales (I_a) de la precipitación total (P) de acuerdo a la Ecuación 4.

$$\frac{P-I_a-Q}{S} = \frac{Q}{P-I_a} \quad (4)$$

El valor de la variable I_a es proporcional a S de acuerdo a un cociente que varía entre 0.095 y 0.38 con una media de 0.2; este valor es el que generalmente se utiliza para desarrollar la ecuación 5 que es la forma más conocida de este modelo.

$$Q = \frac{(P-0.2 S)^2}{P+0.8S} \quad (5)$$

La Ecuación 5 es válida si el valor de P excede al de (0.2 S), de otra manera Q toma el valor de cero. Es importante resaltar el hecho de que la ecuación 5 no considera la intensidad de la precipitación y ésta puede tener una influencia profunda sobre la respuesta hidrológica de un área en particular, ya que la intensidad varía en forma aleatoria a lo largo de la cuenca, dentro y entre eventos lluviosos con los mayores contrastes entre lluvias de tipo convectivo y las producidas por frentes húmedos. La ausencia de las variables relacionadas con la intensidad de lluvia es la causa principal de los errores en la estimación del escurrimiento superficial sobre todo cuando ocurren tormentas de muy baja o muy alta intensidad. Por otra parte, el valor de 0.2 de la ecuación 5 se derivó de cuencas agrícolas cuya superficie fluctuó alrededor de 4.5 hectáreas y en un régimen pluviométrico de 600 milímetros anuales en promedio. La aplicación de esta ecuación en ambientes diferentes puede producir errores cuya magnitud depende de la desviación entre las cuencas en estudio y las descritas a partir de

las cuales fue desarrollada. El parámetro S en la ecuación 5 incluye las abstracciones iniciales y todas las pérdidas que ocurren una vez que se inicia el escurrimiento superficial. Esas abstracciones están relacionadas con la densidad y estructura de la cubierta vegetal que causan las intercepciones sobre la superficie del suelo y la capacidad del suelo para almacenar y transmitir agua. La variabilidad espacial de estos factores es una fuente importante de errores en la estimación de Q. El valor de S se puede obtener a partir de un valor estándar conocido como Número de Curva (ecuación 6) que representa las características de uso del suelo (agrícola, urbano, forestal, etc., cobertura, tratamiento de conservación) y el grupo hidrológico del suelo (A-D); la clase A corresponde a los suelos más permeables mientras que la clase D incluye a los suelos con mayor potencial de escurrimiento.

$$S=254 \left(\frac{100}{CN} -1 \right) \quad (6)$$

Los valores de CN de acuerdo a los factores que los determinan aparecen en numerosas referencias, algunas de ellas enlistadas al final de este capítulo y corresponden a condiciones de humedad intermedias y donde la pendiente es del 5 por ciento. Por lo tanto, se deben realizar los ajustes correspondientes a estos factores. Estos ajustes no se presentan en este documento, sin embargo es oportuno señalar que los modelos que utilizan el método de la curva numérica han demostrado la mayor sensibilidad en la simulación del escurrimiento superficial, al valor de CN.

El método de la curva numérica como se ha descrito hasta aquí incorpora componentes estocásticos y determinísticos. Los procesos estocásticos incluyen la variabilidad espacial y temporal de la precipitación, vegetación y las propiedades hidrodinámicas del suelo, mientras que los procesos determinísticos incluyen las variables relacionadas con la conducción del flujo superficial, entre ellas la pendiente del terreno. La estimación de parámetros relacionados con procesos estocásticos requiere el uso de datos observados de alta calidad para ser utilizados en pruebas de calibración del modelo, mientras que los parámetros relacionados con las características físicas del medio (como la pendiente) simplemente son

determinados (calculados) y utilizados en la parametrización del modelo. Por lo tanto, la mejor manera de establecer valores de la curva numérica en este método es a través de pruebas de calibración usando datos observados de escurrimiento con mínimo error.

6.3.4 Escurrimiento máximo (Q_p).

La estimación de la tasa de erosión con la Ecuación 2 requiere el valor del escurrimiento máximo (Q_p); éste se puede calcular por diversos métodos, uno de ellos es el conocido como la Fórmula Racional Modificada que establece:

$$Q_p = \frac{aQA}{360 \tau_c} \quad (7)$$

Donde a es un parámetro que expresa la proporción de la lluvia total que ocurre durante el tiempo de concentración τ_c ; Q es el escurrimiento superficial de acuerdo a la ecuación 5 después de los ajustes necesarios; A es el área de escurrimiento (ha); τ_c es el tiempo de concentración (h) que suma los tiempos de escurrimiento en la ladera y en el canal, las ecuaciones correspondientes a τ_c quedan fuera del objetivo de este documento, para mayores detalles el lector debe consultar la literatura especializada.

6.3.5 Factores de erosión (K , C , P y LS).

El parámetro K representa la condición de erodabilidad del suelo y se calcula:

$$K = (0.2 + 0.3e^{[-0.0256S_n(1-S_i/100)])} \left(\frac{S_i}{C_i + S_i} \right)^{0.3} \left[1 - \frac{0.25 C}{C + e^{(3.72 - 2.95C)}} \right] \quad (8)$$

Donde S_n es el contenido de arena (%), S_p es el contenido de limo (%), C_l es el contenido de arcilla (%), y C es el contenido de carbono orgánico (%). Generalmente el factor K se evalúa al inicio de cada año de simulación y para ello es necesario contar con los valores del análisis textural y del contenido de materia orgánica.

El factor C representa las características de cubierta del suelo que afectan la erosión hídrica, e incluyen la presencia de vegetación, mantillo, suelo expuesto y el manejo del suelo. El efecto de estas características sobre el desprendimiento y arrastre de partículas de suelo está integrado en este parámetro.

$$C = e^{[(-0.223 - CVM) \times CVM_p^{(-0.00115CM) + CVM}]} \quad (9)$$

$$CVM = 1.463 \ln(CVA) + 0.1034 \quad (10)$$

Donde CM es la cobertura total del suelo como biomasa y residuo o mantillo, (kg ha^{-1}), CVM es el valor mínimo de C . Las ecuaciones 9 y 10 aplican para cualquier tipo de cubierta vegetal, aunque una manera más práctica de obtener el parámetro C en cubiertas típicas de pastizal, es mediante la Tabla 6.1 que relaciona el valor de C con las características de la vegetación, tanto en composición como en densidad o grado de cobertura.

Tabla 6.1 Valores del factor C de acuerdo al tipo y densidad de cubierta vegetal en pastizales semi-áridos (*).

Cubierta vegetal	Cobertura (%)	Tipo	Cobertura basal (%)					
			0	20	40	60	80	95-100
Inapreciable		P	0.45	0.20	0.10	0.042	0.013	0.003
		A	0.45	0.24	0.15	0.090	0.043	0.011
Maleza alta o matorral bajo (0.50 m)	25	P	0.36	0.17	0.09	0.38	0.012	0.003
		A	0.36	0.20	0.13	0.082	0.041	0.011
	50	P	0.26	0.13	0.07	0.035	0.012	0.003
		A	0.26	0.16	0.11	0.075	0.039	0.011
Matorral alto (0.5-2.0 m)	25	P	0.40	0.18	0.09	0.040	0.013	0.003
		A	0.40	0.22	0.14	0.085	0.042	0.011
	50	P	0.34	0.16	0.085	0.038	0.012	0.003
		A	0.34	0.19	0.13	0.081	0.041	0.011

P: Planta tipo pasto y residuo vegetales

A: Planta de hoja ancha

(*) Fuente: Renard *et al.*, 1974.

El factor PE se refiere a las prácticas de control de la erosión, tales como la construcción de terrazas, cultivos en contorno, Un valor de 1.0 corresponde a cuencas semiáridas con uso pecuario y con alteraciones mínimas del medio.

El factor LS se calcula:

$$LS = \left(\frac{\lambda}{22.1}\right)^3 (65.41s^2 + 4.565s + 0.06) \quad (11)$$

$$\mathfrak{S} = 0.6[1 - e^{(-35.835s)}] \quad (12)$$

Donde λ es la longitud de la ladera (m) y s es su pendiente ($m\ m^{-1}$). En contraste con el factor PE , la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo ha

demostrado la mayor sensibilidad al factor LS por lo que es sumamente importante contar con un dato exacto de las variables que lo determinan.

Los parámetros C y K están relacionados con la densidad de la cubierta vegetal y las características mecánicas del suelo superficial (contenido de materia orgánica y grado de compactación). Aunque existen procedimientos para la obtención de los valores de los factores C y K a partir de datos publicados, es más recomendable su obtención a partir de pruebas de calibración con datos observados de precipitación y escurrimiento-erosión en cuencas experimentales o lotes de escurrimiento monitoreados en las pruebas de lluvia simulada. Para los propósitos de este estudio, los valores de C se derivaron de fuentes documentales debido a que se contó con un muestreo exhaustivo de los factores que lo determinan como se presenta en la Tabla 6.2, por lo tanto, sólo el factor K quedó sujeto a estimación a partir de los datos observados de precipitación-escurrimiento-sedimentos.

Tabla 6.2 Características de las parcelas de observación con lluvia simulada.

Parcela	Septiembre, 1996	Mayo, 1997	Pendiente	CAHS
191	Pasto alto, 57 % cobertura	Veg. inapreciable, 30 % cobertura	0.0731	0.0708
192	Pasto alto, 76 % cobertura	Veg. inapreciable, 30 % cobertura	0.0679	0.0708
193	Pasto alto y arbustos, 45 % cobertura	Veg. inapreciable, 30 % cobertura	0.0656	0.0708
194	Pasto alto y arbustos, 42 % cobertura	Veg. inapreciable, 30 % cobertura	0.0623	0.0708
195	Pasto bajo y arbustos, 33 % cobertura	Suelo desnudo	0.1237	0.0626
196	Pasto bajo y arbustos, 16 % cobertura	Suelo desnudo	0.1200	0.0626
197	Pasto bajo y arbustos, 18 % cobertura	Suelo desnudo	0.0942	0.0626
198	Pasto bajo y arbustos, 21 % cobertura	Suelo desnudo	0.0970	0.0626
191-194: La Campana		195-198: Nuevo Delicias		

6.4 Estimación de CN, C, LS y K en pastizales semiáridos.

La tecnología para el manejo de pastizales implica un sistema de decisiones orientado a maximizar la productividad y prevenir la erosión del suelo. Este proceso tiene lugar cuando la erosividad de la lluvia causa remoción del suelo superficial debido a la ausencia de vegetación y ésta se puede deber a sobrepastoreo. La evaluación del efecto del sobrepastoreo sobre la dinámica del proceso erosivo requiere el establecimiento de parcelas experimentales tanto en un pastizal con manejo dentro de los límites de su capacidad de carga, como en otro que se considere sobrepastoreado. El Rancho Experimental La Campana (INIFAP) en Chihuahua cumple con las condiciones de manejo dentro de los límites de capacidad de carga animal y es representativo de los pastizales semiáridos del Norte de México. En contraste, las áreas aledañas de pastizal que se encuentran dentro del perímetro del Ejido Nuevo Delicias presentan signos de sobrepastoreo que se manifiestan en una reducida densidad de vegetación, presencia de pequeñas cárcavas, suelo poco profundo, pobre en materia orgánica, y afloramientos de caliche.

Los anteriores sitios se seleccionaron como representativos de dos sistemas de manejo contrastantes para llevar a cabo pruebas de simulación de lluvia que permitieran caracterizar la condición hidrológica de los suelos a través del valor de la curva numérica y el nivel de erodabilidad asociado con la composición del suelo y la densidad de la vegetación. Las pruebas se realizaron durante los meses de septiembre de 1996 y mayo de 1997; estas fechas coinciden con el inicio y final de la estación de sequía respectivamente, lo que corresponde a las condiciones extremas de cobertura de la superficie del suelo. La Tabla 6.2 muestra los datos de la descripción de los sitios de estudio que demuestran una condición de cobertura del suelo con vegetación más densa en La Campana que en Nuevo Delicias. Por el contrario, en Nuevo Delicias la superficie del suelo tiene mayor pendiente y menor capacidad de almacenamiento de agua (CAHS).

Las pruebas de simulación de lluvia se realizaron sobre cuatro parcelas en cada sitio de estudio utilizando el simulador giratorio. Los materiales de instalación y procedimientos se ajustaron a los métodos que se han descrito en un capítulo previo de este documento. La condición de humedad antecedente fue SECO y HUMEDO tanto para las pruebas realizadas en septiembre de 1996 como para las realizadas en mayo de 1997. La primera se consiguió al realizar las

pruebas después de al menos 10 días libres de lluvia natural mientras que la segunda se realizó 30 minutos después de la primera. La duración de los eventos de lluvia fue de 30 minutos en condición seca en septiembre de 1996 y de 45 en los de mayo de 1997, mientras que en los de condición húmeda fue variable ya que fue necesario esperar la estabilización del flujo de salida. La intensidad de precipitación se mantuvo casi constante a 60 mm h^{-1} en las pruebas en seco mientras que en las pruebas en húmedo ésta fue variable en secuencias de 60-120-60 mm h^{-1} . La duración de cada intensidad dependió del tiempo en que se lograba la condición de flujo estable.

El gasto del escurrimiento superficial se registró en forma automática y continua durante los eventos de simulación de lluvia; los hidrogramas resultantes fueron analizados posteriormente para obtener el valor de Q y Q_p . En contraste, la producción de sedimentos se evaluó mediante muestreos manuales a intervalos de 1-2 minutos durante la fracción de incremento rápido del escurrimiento en el hidrograma, 5-10 minutos durante la fracción de flujo estable y 0.5-1.0 minutos durante el inicio de la recesión. En la Tabla 6.3 se resume la información registrada en todas las pruebas desarrolladas. Debe notarse, que los valores de intensidad de precipitación corresponden al valor máximo registrado en un punto de muestreo y es ligeramente diferente a los valores de diseño para toda el área de trabajo; esto es porque aún a esta escala existe variabilidad espacial de la precipitación.

El valor de CN se puede obtener a partir de la ecuación 6 como una función de S . Cuando están disponibles los datos de lluvia y escurrimiento - como en el caso de las pruebas de simulación de lluvia- el parámetro S se calcula con la ecuación 13

$$S=5(P+2Q-(4Q^2+5PQ)^{0.5} \quad (13)$$

La Tabla 6.4 muestra los valores resultantes de CN en relación con la condición antecedente de humedad del suelo para ambos sitios de estudio. En general se observan valores mayores de CN en Nuevo Delicias (parcelas 195-198), que obedecen principalmente a la baja capacidad de retención de humedad

del suelo y mayor pendiente comparados con las características del suelo en La Campana. Sin embargo, el valor medio se incrementa de 85 en la condición más seca (mayo, 1997) a alrededor de 89 para cualquier condición húmeda. En el caso de La Campana, el incremento se observa sólo de la condición más seca (mayo, 1997) a la medianamente húmeda (septiembre, 1996); ambas como condición inicial en las pruebas de simulación de lluvia. Esta tendencia podría atribuirse al hecho de que en septiembre se alcanza rápidamente la saturación del estrato superficial por encontrarse el suelo cercano a capacidad de campo propiciando un mayor escurrimiento superficial. Sin embargo, el valor medio de CN en las pruebas subsiguientes a las iniciales (incisos b y d en la Tabla 6.4) tiende a reducirse considerablemente (siete unidades en ambos casos). Esta tendencia no parece normal, ya que el suelo se encontraba casi saturado, aunque por tratarse de un suelo profundo y arenoso, es probable que el flujo vertical llega a ser considerablemente mayor que en la condición inicial. Estos resultados indican que es necesario profundizar el análisis del efecto de la condición de humedad antecedente sobre el comportamiento hidrodinámico de suelos con estas características.

Los valores resultantes del factor C aparecen en la Tabla 6.4 y muestran un notable incremento entre los correspondientes a septiembre y mayo tanto en La Campana como en Nuevo Delicias. Mientras que la media en La Campana se incrementa de 0.067 a 0.150, en Nuevo Delicias se incrementa de 0.175 a 0.45. Estas tendencias demuestran que en el primer sitio la cubierta vegetal presenta mayor protección a la erosividad de la lluvia (factor de tres) no sólo al inicio de la estación seca, sino también a lo largo de ésta.

El factor LS se calculó a partir de las ecuaciones 11 y 12 de acuerdo al valor de la longitud (10.65 m) y de la pendiente para cada parcela (Tabla 6.2). La Tabla 4 muestra los valores correspondientes a este factor que demuestran valores significativamente menores para las parcelas de La Campana (0.408 a 0.498) con respecto a los de Nuevo Delicias (0.735 a 1.058) lo que hace a los primeros menos susceptibles a la erosión que los segundos.

Tabla 6.3 Variables registradas en las parcelas de simulación de lluvia.

Parcela	Duración (min)	Intensidad (mm h ⁻¹)	Lámina (mm)	Q (mm)	Qp (mm h ⁻¹)	Sedimentos (ton ha ⁻¹)
191a	30.0	79.50	39.70	18.90	52.20	0.264
191b	40.0	129.90	86.60	33.50	82.20	0.435
191c	45.0	62.04	46.50	6.95	15.07	1.578
191d	31.7	176.21	93.00	11.60	67.50	2.513
192a	30.0	82.70	41.40	2.90	8.80	0.036
192b	40.0	128.30	85.50	16.30	48.90	0.143
192c	45.0	63.05	47.30	20.00	33.88	4.659
192d	31.7	154.82	81.70	12.80	84.27	3.513
193a	30.0	78.30	39.20	14.50	38.40	0.210
193b	35.0	100.90	58.80	22.80	65.20	0.041
193c	44.3	58.78	43.40	4.10	9.53	0.934
193d	23.0	111.62	42.80	5.52	24.76	1.368
194a	30.0	77.20	38.60	15.30	40.60	0.130
194b	35.0	95.80	55.90	20.90	57.20	0.101
194c	44.3	59.83	59.83	0.62	2.00	0.275
194d	23.0	109.49	42.00	3.07	14.84	0.673
195a	30.0	68.50	34.20	15.90	41.40	0.440
195b	30.0	93.00	46.50	22.50	74.80	0.683
195c	45.0	61.75	46.30	11.00	20.99	4.678
195d	25.0	94.97	39.60	16.10	85.52	5.957
196a	30.0	73.40	36.70	12.80	32.70	0.325
196b	30.0	98.30	49.10	19.70	64.00	0.389
196c	45.0	61.40	46.10	23.60	42.95	9.607
196d	25.0	104.20	43.30	19.40	89.00	7.058
197a	30.0	74.00	37.00	19.50	51.70	0.839
197b	22.0	120.90	44.30	21.60	103.00	0.789
197c	50.0	58.72	48.90	21.60	38.84	4.241
197d	22.0	97.79	35.90	14.30	82.53	2.953
198a	30.0	70.60	35.30	18.10	46.00	0.432
198b	22.0	118.00	43.30	20.40	93.20	0.529
198c	50.0	61.14	51.00	19.30	33.47	3.596
198d	22.0	104.70	38.40	18.90	103.08	4.774

a) seco, sept. 1996 b) húmedo, sept 1996 c) seco, mayo 1997 d) húmedo, mayo 1997

Finalmente, el factor K se obtuvo al despejar dicha variable de la ecuación 2 dado que el resto de variables estuvieron disponibles. El total de observaciones fue de 16 tanto para La Campana como para Nuevo Delicias (Tabla 6.4), de los cuales, la media y desviación estándar fueron de 0.086 (0.086) y 0.016 (0.012) respectivamente. Estos valores indican que la mayor tasa de erosión observada en las pruebas de simulación de lluvia en Nuevo Delicias está asociada a la mayor pendiente y menor cobertura vegetal que en La Campana. En términos generales los valores de desviación estándar indican que existe una gran variabilidad del factor K (coeficiente de variación de 100 y 80 % respectivamente) a pesar de que el área de muestreo es de 32 metros cuadrados. Algún esfuerzo por obtener valores inferiores del coeficiente de variación requerirá la instrumentación de pequeñas cuencas naturales, aunque los aquí mostrados pueden ser de gran utilidad en la generación de series sintéticas de datos con fines de análisis de sensibilidad y calibración de modelos de simulación.

6.5 Comentarios finales.

Los estudios de simulación de lluvia en dos sitios representativos de los pastizales semiáridos del norte de México indican que la variabilidad de las características de los suelos relacionadas con la intensidad de pastoreo además de la profundidad y textura pueden afectar el potencial de generación de escurrimiento superficial. Esta variable se puede representar a través del valor de la Curva Numérica, el cual mostró valores mayores en los sitios de suelo menos profundo y con mayor pendiente. Por el contrario, los menores valores se observaron en los sitios con mayor profundidad de suelo, textura ligera y pendiente reducida. Lo anterior es congruente con los reportes científicos sobre el tema, sin embargo, se observaron reducciones en el valor de CN en condiciones de suelo saturado. Estos resultados son opuestos a lo que podría esperarse de acuerdo a los fundamentos del modelo de la curva numérica, lo que hace necesario profundizar el análisis de los procesos de flujo en medio saturado para este tipo de suelos.

La tasa de erosión hídrica es el resultado del efecto de las características del escurrimiento superficial y de la resistencia que presenta la superficie a ser erosionada, y ésta está relacionada con la pendiente del terreno, la cubierta vegetal

y la susceptibilidad del suelo al desprendimiento y arrastre de partículas. Las pruebas de simulación de lluvia permiten estimar este último factor una vez que los primeros han sido determinados a partir de mediciones exhaustivas sobre los sitios en estudio. El factor de erodabilidad del suelo K, está sujeto a grandes variaciones espaciales por depender de variables texturales. Su estimación es posible en áreas de muestreo considerablemente grandes como las parcelas de simulación de lluvia. Para ello es necesario hacer una correcta caracterización del estado de superficie y de la dinámica del escurrimiento superficial.

Tabla 6.4. Coeficientes de escurrimiento superficial y erosión hídrica derivados a partir de pruebas de simulación de lluvia.

Parcela	Curva numérica	Factor C	Factor LS	Factor K
191a	90.19	0.035	0.498	0.027
191b	76.3	0.035	0.498	0.025
191c	73.96	0.150	0.498	0.132
191d	56.46	0.150	0.498	0.068
192a	69.76	0.012	0.454	0.091
192b	64.07	0.012	0.454	0.053
192c	86.77	0.150	0.454	0.151
192d	62.38	0.150	0.454	0.088
193a	87.12	0.110	0.435	0.011
193b	82.62	0.110	0.435	0.001
193c	71.08	0.150	0.435	0.156
193d	74.12	0.150	0.435	1.113
194a	88.14	0.110	0.405	0.007
194b	82.75	0.110	0.405	0.004
194c	60.16	0.150	0.405	0.337
194d	69.78	0.150	0.405	0.110
195a	91.16	0.100	1.058	0.009
195b	88.94	0.100	1.058	0.009
195c	79.28	0.450	1.058	0.040
195d	88.17	0.450	1.058	0.019
196a	87.15	0.200	1.010	0.005
196b	85.56	0.200	1.010	0.003
196c	89.91	0.450	1.010	0.037
196d	88.51	0.450	1.010	0.020
197a	92.05	0.200	0.704	0.010
197b	89.52	0.200	0.704	0.006
197c	87.00	0.450	0.704	0.026
197d	88.98	0.450	0.704	0.015

continuación

198a	92.06	0.200	0.735	0.006
198b	89.25	0.200	0.735	0.004
198c	84.24	0.450	0.735	0.025
198d	90.94	0.450	0.735	0.018

a) seco, sept. 1996 b) húmedo, sept 1996 c) seco, mayo 1997 d) húmedo, mayo 1997

Referencias Bibliográficas

- Arnold, J. G. 1990. ROTO-A continuous water and sediment routing model. Watershed Management Symposium pp. 480-488. Durango, CO. ASCE.
- Arnold, J. G., J. R. Williams, R. Srinivasan, K. W. King and R. H. Griggs. 1994. SWAT Soil and Water Assessment Tool. Temple, TX: USDA-ARS.
- Arnold, J. G., J. R. Williams, A. D. Nicks and N. B. Sammons. 1990. SWRRB A basin scale simulation model for soil and water resources management. College Station: Texas A&M University Press.
- Beven, K. 1985. Distributed models. *In: Anderson and Burt (Eds), Hydrological Forecasting*. John Wiley and Sons Ltd.
- Beven, K. 1986. Runoff production and flood frequency in catchments of order n: An alternative approach. *In: Gupta et al (Eds), Scale Problems in Hydrology*. D. Reidel Publishing Company. Pp. 1-17.
- Brooks, K. N., P. F. Ffolliott, H. M. Gregersen, and J. L. Thames 1993. Hydrology and the management of watersheds. Iowa University Press.
- Comisión Nacional de las Zonas Áridas, 1994. Plan de acción para combatir la desertificación en México PACD-México. 160 p.
- Descroix, L. y J. F. Nouvelot. 1997. Escurrimiento y erosión en la Sierra Madre Occidental. Folleto Científico No. 7. CENID RASPA-INIFAP-SAGAR.
- Govers, G. 1990. Empirical relationships for the transport capacity of overland flow. Erosion, Transport and Deposition Processes. IAHS. Publ. No. 189. P1-64.
- Hardisty, J., D.M. Taylor, and S. E. Metcalf 1993. Computerized Environmental Modelling. A Practical Introduction Using Excel. Wiley.
- Jasso I., R. 1998. Sensitivity analysis of water and sediment yield to parameter values and their spatial aggregation using SWAT watershed simulation model. Ph.D. Dissertation. The University of Arizona. Tucson, AZ 211 p.

- Kassas, M. 1987. Drought and desertification. *Land Use Policy* 4(4):389-400.
- Kirkby, M. J., P. S. Naden, T. P. Burt and D. P. Butcher. 1992. Computer simulation in physical geography. John Wiley & sons.
- Knisel, W. G. 1980. CREAMS, A field scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural systems management. Res. Rep. 27. Washington, D. C. USDA.
- Lane, L. J. (Ed.), 1986. Erosion on rangelands: Emerging technology and data base. Proceedings of the Rainfall Simulator workshop. Tucson, AZ.
- Lane, L. J., M. A. Nearing, J. M. Laflen, G. R. Foster and M. H. Nichols. 1992. Description of the US Department of Agriculture water erosion prediction project (WEPP) model. In: A. J. Parsons and A. Abrahams (Eds.), *Overland Flow-Hydraulics and Erosion Mechanics*. UCL Press Ltd.
- McCuen, R. H. 1973. The role of sensitivity analysis in hydrologic modeling. *Journal of Hydrology* 37-53.
- McCuen, R. H. and W. M. Snyder 1986. Hydrologic modeling. Statistical methods and applications. Prentice-Hall.
- Mellerowicz, K. T., H. W. Rees, T. L. Chow, and I. Ghanem 1994. Soil conservation planning at the watershed level using the universal soil loss equation with GIS and microcomputer technologies: A case study. *J. Soil and Water Cons* 49:194-200.
- Mesa, O. J. and E. R. Mufflin 1986. On the relative role of hillslope and network geometry in hydrologic response. In: Gupta et al (Eds), *Scale Problems in Hydrology*. D. Reidel Publishing Company. Pp. 1-17.
- Osborn, H. B. and J. R. Simanton 1989. Gullies and sediment yield. *Rangelands* 11(2):51-56.
- Osterkamp, W. R. 1995. Effects of scale on interpretation and management of sediment quality. AHS Publication No. 226.
- Pilgrim, D. H. and I. Cordery 1993. Flood Runoff. In: D. R. Maidment, (Ed) *Handbook of Hydrology*. Mc. Graw Hill.
- Ponce, V. M. and R. H. Hawkins 1996. Runoff Curve Number: Has it reached maturity? *Journal of Hydrologic Engineering* 1(1):11-19.
- Renard, K. G., G. R. Foster, G. A. Weesies, D. K. McCool y D. C. Yoder (Coordinators) 1997. Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) USDA-ARS Agric. Handb. No. 703.
- Renard, K. G., J. R. Simanton and h. B. Osborn 1974. Applicability of the Universal Soil Loss Equation to semiarid rangeland conditions in the Southwest.

Hydrology and Water Resources in Arizona and the Southwest Proceedings. Flagstaff, AZ. p. 18-32.

- Renard, K. G., L. J. Lane, J. R. Simanton, W. E. Emmerich, J. J. Stone, M. A. Wetz, D. C. Goodrich, and D. S. Yakowitz 1993. Agricultural impacts in an arid environment: Walnut Gulch studies. *Hydrological Science and Technology* 9:145-190.
- Sharma, K. D. and J.S.R.Murthy 1994. Modelling sediment transport in stream channels in the arid zone of India. *Hydrological Processes* 8:567-572.
- Simanton, J. R. , K. G. Renard and N. G. Sutter. 1973. Procedure for identifying parameters affecting storm runoff volumes in a semiarid environment. ARS-W-1. Berkeley, CA: USDA.
- Smith, J. A. 1993. Precipitation. *In: D. R. Maidment (Ed.). Handbook of Hydrology* Mc. Graw Hill, Inc.
- Sorooshian, S. and V. K. Gupta. 1995. Model Calibration. *In: Singh (Ed) Computer models of watershed hydrology*, Water Resources Publications.
- Stone, J. J., K. G. Renard, and L. J. Lane 1996. Runoff estimation on agricultural fields. *In: Agassi, Soil Erosion and Rehabilitation*. Marcel Dekker, Inc.
- Walsh, S. J. 1985. Geographic information systems for natural resources. *J. Soil and Water Conservation* 40(2):202-205
- Warren, S. D., V. E. Diersing, P. J. Thompson, and W. D. Goran 1989. An erosion-based land classification system for military installations. *Environmental Management* 13(2):251-257.
- Wen-Shen, H. And P. Julien. 1993. Erosion and sediment trasport. *In: D. R. Maidment (Ed.) Handbook of Hydrology*. Mc. Graw Hill, Inc.
- Wigmosta, M. S., L. W. Vail and D. P. Lettenmaier 1994. A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain. *Water Resources Research* 30:1665-1679.
- Williams, J. R. 1991 Runoff and water erosion. Pp. 439-455 in Hanks, R. J. and J. T. Ritchie: Modeling plant and soil systems. Agronomy Series No. 31.
- Wischmeyer, W. H. y D. D. Smith. 1978. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. U. S. D. A. Agric. Handb. No. 537.

Capítulo VII

**SIMULACIÓN DE LLUVIA PARA LA CARACTERIZACIÓN
HIDROLÓGICA Y DE EROSIÓN DE SUELOS BAJO
LABRANZA CONVENCIONAL
Y LABRANZA CERO**

Mario Tiscareño López
Mario Tapia Vargas
Alma Delia Báez González
Miguel Velázquez Valle

7.1 Introducción.

La energía cinética de las tormentas, que desprende partículas de suelo por el impacto de las gotas de lluvia, y el esfuerzo cortante del flujo acanalado, que resulta del escurrimiento superficial, constituyen las fuerzas abrasivas del agua en la naturaleza que han dado forma al paisaje a través del paso del tiempo. Por su parte, la velocidad con que se mueve el agua superficial constituye el mecanismo geomorfológico que determina la fertilidad de los suelos como resultado del proceso de la erosión, transporte y sedimentación de partículas de suelo, así como del consecuente arrastre de nutrimentos, al que esta sujeto cualquier ecosistema terrestre. En la medida que los terrenos detienen el flujo superficial y subsuperficial del agua, el aumento del tiempo de residencia del agua en los ecosistemas acelera los procesos bióticos e incrementa la rapidez de los ciclos biogeoquímicos.

Sin embargo, desde el advenimiento de la agricultura hace poco más de 10 mil años, el proceso de la erosión ha sido acelerado principalmente por las actividades antropogénicas, sobretodo con la invención del arado que provoca la inversión de las capas de suelo y la remoción de toda vegetación que no sea la especie cultivada. En la actualidad la agricultura que se realiza en mayor o menor grado en todos los países está basada en el uso de arado.

El arraigo entre los agricultores del sistema de laboreo convencional (el

uso generalizado del movimiento mecánico del suelo utilizando el arado) se debe a los efectos inmediatos en los cultivos a la aplicación de fertilizante que proveen los elementos requeridos por las plantas en moléculas rápidamente asimilables. Sin embargo, es hasta años recientes cuando se ha notado y demostrado una disminución continua en la productividad de los suelos agrícolas a consecuencia de una menor fertilidad. Esto ha obligado a los agricultores a aplicar dosis de fertilizantes más elevadas para mantener los niveles de productividad económicamente deseables. Esto es resultado de la eliminación total de la vegetación natural o de cosecha que caracteriza a la agricultura intensiva actual y que ha acelerado el proceso de erosión por pérdida de la materia orgánica que da estructura a los suelos.

Se estima que los suelos del mundo han perdido el 30 por ciento de su materia orgánica y el 15 en la capacidad de retención de humedad como resultado de la eliminación total de las cosechas de los terrenos de cultivo, incluyendo los residuos, y que de seguir el patrón actual de laboreo de los suelos se liberarán anualmente 61 mil millones (61×10^{10}) de toneladas de carbono a la atmósfera durante los próximos 60 años por la eliminación de la materia orgánica de los suelos. En otras palabras, el sistema actual de cultivo tiene un impacto directo en el Calentamiento Global de la Tierra exacerbando el efecto de invernadero por constante incremento del CO_2 en la atmósfera, y otros gases radiactivos como el metano y el óxido nítrico.

Por lo anterior mencionado, los procesos biofísicos que ocurren en los ecosistemas edáficos deben ser bien entendidos para la identificación de sistemas de producción alternativos requeridos para incrementar la productividad agropecuaria mundial. Cuantificar los procesos hidrológicos y de erosión constituyen elementos primordiales para evaluar sistemas de labranza dentro del rigor científico requerido para recuperar y/o mantener el balance hidrológico de los ecosistemas sujetos a actividades humanas para la producción de alimentos.

El presente Capítulo discute la aplicación de la simulación de lluvia para la caracterización hidrológica y de erosión de los terrenos agrícolas en una cuenca de 100 mil hectáreas, en un proyecto orientado a modificar el ciclo hidrológico local que permita la recarga de un cuerpo lacustre a través del incremento de la infiltración y la disminución del azolve del lago, mediante la disminución de la erosión hídrica causada por el escurrimiento superficial.

7.2 El Problema del Lago de Pátzcuaro.

Durante los últimos 100 años, la presión demográfica sobre los recursos naturales de la Cuenca del Lago de Pátzcuaro en el Estado de Michoacán ha provocado un cambio en la cubierta vegetal como resultado de la expansión de la frontera agrícola a expensas de la vegetación nativa: el bosque. La incorporación de terrenos de ladera a las actividades agrícolas ha incrementado de manera significativa las tasas de erosión por arriba de los límites tolerables de pérdida de suelo con efectos adversos en la calidad del agua por la sedimentación y eutroficación del Lago de Pátzcuaro, donde se concentran los escurrimientos de esta cuenca cerrada.

Los últimos estudios indican que el lago está reduciendo su extensión en 0.73 km^2 por año considerando su superficie a los años de 1944 y 1998. El área agrícola actual se extiende a más de 20 mil hectáreas, distribuidas desde terrenos ubicados en la rivera del lago que tienen casi cero pendiente hasta terrenos que sobrepasan el 45 por ciento de pendiente en las partes altas de la cuenca. Los modelos de erosión aplicados indican tasas anuales de erosión que varían desde menos de una ton ha^{-1} por año hasta más de 150. El promedio anual de la pérdida de suelo en terrenos cultivados bajo laboreo convencional es de 16.3 ton ha^{-1} y la contribución de todos los terrenos es de 132 mil toneladas de suelo por año. Es importante mencionar que el problema de la erosión se agudiza al aplicar el "Sistema de Año y Vez" (los suelos son cultivados uno de cada dos años) en los terrenos Andosoles. Bajo este sistema, los suelos son dejados desnudos cada tercer año, permitiendo a los animales pastorear los residuos de cosecha del año anterior así como las malezas que germinan con las lluvias del verano. Es importante mencionar que los suelos de Ando son altamente erosionables dada su baja condición estructural y densidades aparentes menores a 1 g cm^{-3} .

Debido a la reducción del área forestal y la veda impuesta para talar el bosque como mecanismo de conservación obligada de los recursos naturales, los habitantes de la cuenca han limitado sus actividades a la agricultura, la pesca y la fabricación de artesanías de madera. Desafortunadamente, la desmedida actividad pesquera ha ocasionado una reducción significativa de los volúmenes de pesca ocasionando que esta actividad se encuentre en decadencia.

La protección de los recursos naturales se ha convertido en una necesidad urgente para incrementar la productividad de la agricultura local y mejorar la

calidad del agua para beneficio de la actividad pesquera. La protección del suelo contra los efectos nocivos de la erosión se torna como una prioridad básica de estudio en la identificación de sistemas alternativos de producción de cultivos anuales, principalmente el maíz. Entre las tecnologías alternativas se encuentra a la labranza de conservación, que por el nulo movimiento del suelo y el uso de coberturas de mantillo como elemento protector del suelo contra la erosión, se fincan grandes esperanzas para solucionar el problema de la erosión y el escurrimiento superficial excesivo. La evaluación de la labranza de conservación, en sus modalidades de labranza cero y mínima, ha sido evaluada en lotes de escurrimiento para la identificación de respuestas hidrológicas de campos cultivados con maíz de temporal. Desafortunadamente, por la extensión que ocupa este dispositivo experimental, la información obtenida solamente tiene validez puntual creando dificultades para conocer el comportamiento hidrológico de otros sitios de la cuenca.

Una herramienta que el Centro Nacional de Investigación para Producción Sostenible (CENAPROS) está aplicando para obtener información integral de la cuenca es la modelación de procesos biofísicos. Esto brinda la oportunidad de extrapolar e interpolar las respuestas hidrológicas obtenidas con modelos de simulación después de una fase de calibración utilizando los datos observados de los lotes experimentales. La estimación de parámetros hidrológicos utilizando simulación de lluvia ha permitido obtener la información requerida por los modelos y que los lotes de escurrimiento no proveen.

7.3 Los simuladores de lluvia en la investigación.

La simulación de lluvia es la aplicación del agua en forma de gotas de lluvia sobre lotes de suelo con la finalidad de entender sus respuestas hidrológicas cuando estos son expuestos a tormentas naturales. La simulación de lluvia es una técnica comúnmente empleada en estudios de infiltración, erosión y escurrimiento superficial, ya que permite emular condiciones lluviosas en lugares y tiempos deseados por el investigador, además de poder diseñar las tormentas. La investigación con simuladores de lluvia es muy diversa, se ha aplicado para estudiar la erosión de suelos en los pastizales, en la parametrización de modelos hidrológicos, la contaminación resultante en la fertilización con excretas de animales, y la caracterización hidrológica de terrenos agrícolas sujetos a labranza

de conservación, entre algunas aplicaciones.

Los estudios de modelación de procesos hidrológicos que aplican simulación de lluvia tienen dos propósitos: 1) estimar los parámetros que requieren los modelos y 2) caracterizar hidrológicamente sitios para los cuales se quieren datos y no disponen de equipo aforador. Entre los parámetros para los cuales se aplica la simulación de lluvia está la conductividad hidráulica saturada, el parámetro de erosión acanalada, el parámetro de erosión laminar, y el punto crítico cortante del flujo acanalado. Entre las respuestas hidrológicas obtenidas con simuladores de lluvia está la curva de infiltración, tasas de escurrimiento y erosión, fuga de nutrimentos y el tamaño de partículas en el escurrimiento. Por su parte, la caracterización hidrológica puede realizarse en cuencas agrícolas, pastizales y mixtas, y los sitios donde se aplica la simulación de lluvia por lo general son los sitios representativos de la cuenca considerando la dominancia de las unidades de suelos y vegetación.

La época en que se lleva a cabo la simulación, duración de la corrida, la intensidad de lluvia, número de muestras y los parámetros de suelo a medir, son variables que determinan la manera de conducir la simulación de lluvia. Es importante mencionar que algunos de estos parámetros pueden estimarse por otros métodos aparte de la simulación de lluvia; sin embargo, siempre debe considerarse tomar la información bajo las condiciones hidrológicas a las que son expuestas los terrenos agrícolas.

7.4 Aspectos Metodológicos.

El sitio experimental se ubica en la localidad de Ajuno, en el municipio de Pátzcuaro, Mich., el Centro Nacional de Investigación para la Producción Sostenible estableció un sitio experimental para realizar investigaciones concernientes al desarrollo de tecnología agrícola para la conservación de los recursos naturales y el incremento de la productividad agropecuaria de la cuenca del Lago de Pátzcuaro. Ajuno se considera representativo de miles de unidades de producción en México que practican agricultura de ladera en Andosoles. El sitio se encuentra a una altura de 2,200 metros sobre el nivel del mar y está regido por el clima templado sub-húmedo con una temperatura media anual de 16 °C y una precipitación anual de 1,002 mm. Los Andosoles regionales se derivan de cenizas volcánicas con más de 4 m de profundidad, textura franca a arenosa, muy

bajo en densidad aparente ($<1.0 \text{ g cm}^{-3}$), pobremente estructurados, fácilmente erodibles bajo condiciones secas o húmedas y pH ligeramente ácido.

7.5 Tratamientos de Labranza.

Se realizó una evaluación de las propiedades hidrológicas de los suelos de Ando que conforman la cuenca del Lago de Pátzcuaro y que están sujetos a los sistemas de labranza convencional y de labranza de conservación como parte de la investigación para identificar prácticas alternativas de manejo de suelo para los sistemas de producción de dicha cuenca. Estas prácticas deberán conservar el suelo y mejorar la productividad de los sistemas de producción.

Para tal propósito, la investigación se centró en la evaluación del régimen hidrológico y de erosión de los terrenos de ladera que son cultivados con maíz de temporal bajo Labranza Convencional (LC) y Labranza Cero con una cobertura total basada en mantillo de residuos de cosecha (Lc-100). Los terrenos bajo LC y Lc-100 corresponden a lotes de escurrimiento de 100 m^2 , donde, desde el año de 1995 se han realizado mediciones del escurrimiento y erosión después de cada evento lluvioso. Como parte complementaria de la investigación, se aplicó simulación de lluvia a dichos tratamientos con la finalidad de medir parámetros hidrológicos de los modelos EPIC y WEPP. Estos modelos fueron generados por el Servicio de Investigación Agrícola del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (ARS-USDA).

7.6 Simulación de Lluvia.

7.6.1 Desprendimiento Laminar.

En lotes experimentales bajo los tratamientos LC y Lc-100 se efectuó simulación de lluvia con un simulador de intensidad variable. Este simulador de lluvia es similar al descrito por Miller (1987), para determinar las tasas de infiltración y el escurrimiento en parcelas de 2 m^2 . Cada parcela se rodeó con un marco metálico enterrado parcialmente hasta una profundidad de 10 cm para delimitar el área de lluvia efectiva. Se simuló lluvia con una intensidad de 135 mm hr^{-1} en gotas con un diámetro de 2.5 mm y una energía cinética de $23 \text{ J m}^{-2} \text{ min}^{-1}$. La tasa efectiva de aplicación se determinó promediando el volumen total de agua captada, durante cinco minutos, por tres pluviómetros tipo cuña, colocados

dentro de las parcelas durante la simulación y obteniendo el valor ponderado de la intensidad de la lluvia con relación a la duración total de la simulación de lluvia. Cada cinco minutos durante la simulación se midió el volumen total del escurrimiento producido y se obtuvo una alícuota de un litro de agua para la determinación de producción de sedimentos en función del tiempo de simulación. Se realizaron dos simulaciones para cada tratamiento: una en seco y otra en húmedo.

La aplicación de la lluvia siguiendo el procedimiento mencionado permitió obtener el parámetro de erodabilidad laminar (K_l), también conocido como parámetro de erosión entre canalillos, aplicando la expresión siguiente:

$$K_l = \frac{D_i}{I^2 * S_f} \quad (\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-4}) \quad (1)$$

Donde:

- K_l = erodabilidad laminar,
- D_i = tasa de desprendimiento entre canalillos ($\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$),
- I = intensidad de la lluvia (m s^{-1}),
- S_f = pendiente del terreno.

7.6.2 Desprendimiento en Canalillos.

En suelo previamente humedecido, y en el límite superior de la parcela de los tratamientos LC y Lc-100a, se aplicó un flujo horizontal de agua aplicado mediante un tubo de PVC con perforaciones a lo largo a cada 5 cm de separación. El flujo se aplicó en incrementos de 5 lps hasta llegar a 35 en cada uno de los tratamientos evaluados. Para cada incremento, y después de haber llegado el escurrimiento al estado estable (lo cual tomó de 6 a 8 minutos), se tomó una muestra del escurrimiento producido registrándose el tiempo requerido para llenar una botella de un litro para evaluar la producción de sedimentos por cada incremento de flujo. Asimismo, se tomó el ancho del cauce, los tirantes del cauce y la velocidad producida por el flujo. Con esta información se determinó el radio hidráulico para cada incremento del flujo que permitió obtener el esfuerzo cortante

(τ) y su resultante producción de sedimentos (Dr). Mediante mínimos cuadrados se logró establecer la relación correspondiente entre τ y Dr e identificar el esfuerzo crítico cortante (τ_c) al cual se inicia el desprendimiento de partículas debido a la energía del flujo acanalado. La expresión de mínimos cuadrados aplicada es la siguiente:

$$Dr = a + b\tau \quad (2)$$

Donde:

$$\begin{aligned} Dr &= \text{desprendimiento en canalillos (kg m}^{-2}\text{s}^{-1}\text{)} \\ \tau &= \text{esfuerzo cortante (Pa)} \end{aligned}$$

La pendiente de la línea de regresión (coeficiente de regresión) corresponde al parámetro de desprendimiento en canalillos (Dr). Por su parte, el esfuerzo cortante crítico (τ_c) es el cociente de la expresión ($\tau_c = -a/b$), inmediatamente cuando Dr comienza a manifestarse.

7.6.3. Conductividad Hidráulica Saturada.

Utilizando los datos de la infiltración ocurrida durante simulaciones de 60 minutos de duración, la ecuación de Green-Ampt permitió estimar la conductividad hidráulica saturada (K_s) en las parcelas de los tratamientos LC y Lc-100. La ecuación de Green-Ampt es la siguiente:

$$F = K_s + \frac{K_s SM}{F} \quad (3)$$

Donde:

- K_s = conductividad hidráulica saturada ($m\ hr^{-1}$)
- S = porosidad efectiva del suelo (adimensional)
- M = potencial mátrico del suelo (mm)
- F = infiltración acumulada (mm)

El cálculo de K_s se realizó mediante mínimos cuadrados resolviendo la ecuación (3) a través de regresión lineal simple.

7.7 Caracterización de los Procesos Erosivos.

7.7.1 Desprendimiento Laminar (Di).

La Tabla 7.1 presenta los resultados obtenidos con las simulaciones de lluvia. Las diferencias en el escurrimiento (Q) y la producción de sedimentos (Di) son atribuidas a las condiciones físicas de los terrenos bajo LC y Lc-100, es decir, al estado de compactación del terreno y la cobertura de residuos. La protección que confiere el mantillo contra la acción erosiva de la lluvia es determinante para reducir la tasa de Di y Q .

Las diferencias entre los dos tratamientos se manifestaron desde el inicio de la simulación; se puede apreciar que a los 10 minutos de la simulación en seco se tenían $0.08\ g\ m^{-2}\ s^{-1}$ de sedimento con 16.3 mm de escurrimiento en LC, mientras que el desprendimiento en Lc-100 era nulo y solamente 1.5 mm escurridos. Este comportamiento continuó durante el resto de los tiempos de simulación, los valores de Di y Q fueron en todos los tiempos superiores en el tratamiento LC.

La consistencia que adquiere el suelo proporcionado por la cero labranza a través del paso del tiempo y la protección de la cobertura residual, le permite reducir las tasas de desprendimiento de partículas de sedimento en comparación con el laboreo convencional donde el suelo es frecuentemente invertido y está desprovisto del mantillo de residuos. Los suelos se vuelven más susceptibles a la erosión laminar después de cada paso de labranza, debido a la pérdida de estructura del suelo y una menor agregación a las partículas. El grado de consolidación de

los suelos tiende a recuperarse conforme se elimina el paso de maquinaria a través del tiempo. Sin embargo, las condiciones de humedad también influyen en la tasa de erosión. En este estudio, ambos tratamientos tuvieron pérdidas de suelo mayores para la corrida en húmedo. LC produjo $1,614 \text{ g m}^{-2}$ en seco, mientras que en húmedo obtuvo $3,084 \text{ g m}^{-2}$ (16.14 vs. $30.84 \text{ ton ha}^{-1}$, respectivamente); por su parte Lc-100 produjo 3.96 g m^{-2} en seco y en húmedo 38.64 g m^{-2} (0.039 vs 0.38 ton ha^{-1} , respectivamente). Estas tasa de erosión están reflejadas en el valor del parámetro de erosión laminar (K_f) calculado, donde LC obtuvo valores de $1'262,608 \text{ kg s}^{-1} \text{ m}^4$ y Lc-100 de $2,552 \text{ kg s}^{-1} \text{ m}^4$.

Tabla 7.1 Escurrimiento y erosión laminar para labranza convencional y labranza cero con 100 por ciento de cobertura con simulación de lluvia. Ajuno, Mich. 1998.

Tiempo (min)	Labranza convencional		Labranza cero-100% cobertura			
	Erosión (D_i) ($\text{g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	Lluvia (mm)	Q^* (mm)	Erosión (D_i) ($\text{g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	Lluvia (mm)	Q (mm)
<i>Simulación en seco</i>						
10	0.08	16.3	0.0	0.0000	19.7	1.5
20	0.14	18.5	6.0	0.0028	18.5	2.6
30	0.79	20.4	8.4	0.0014	15.6	3.2
40	0.53	16.5	10.3	0.0011	21.1	3.5
50	0.65	21.3	11.1	0.0004	21.3	3.7
60	0.50	18.7	11.6	0.0009	21.7	3.8
<i>Simulación en húmedo</i>						
10	0.69	15.3	8.4	0.0054	21.5	2.11
20	0.70	17.8	12.1	0.0016	14.2	7.15
30	0.81	18.0	12.2	0.0237	20.1	8.18
40	1.08	15.8	13.6	0.0089	20.8	8.51
50	0.93	17.0	13.6	0.0133	21.2	8.53
60	0.93	17.0	13.6	0.0115	25.2	8.71

* Q es escurrimiento.

7.7.2 Desprendimiento en Canalillos (Dr).

En la Figura 7.1 se muestra el ajuste lineal obtenido para los datos estimados del esfuerzo cortante del flujo acanalado y el desprendimiento de sedimento observado (Dr). Como puede apreciarse, existen grandes diferencias entre el desprendimiento en canalillos obtenido para Lc-100 y LC; las tasas de Dr son del orden de 0 a $1.5 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ para Lc-100 y de 100 a $500 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ para LC, lo cual indica, la susceptibilidad del suelo de Ando a la labranza intensiva, ya que se induce a la erosión acanalada por la baja condición estructural de los agregados de suelo y la ausencia de vegetación capaz de reducir la velocidad del escurrimiento superficial.

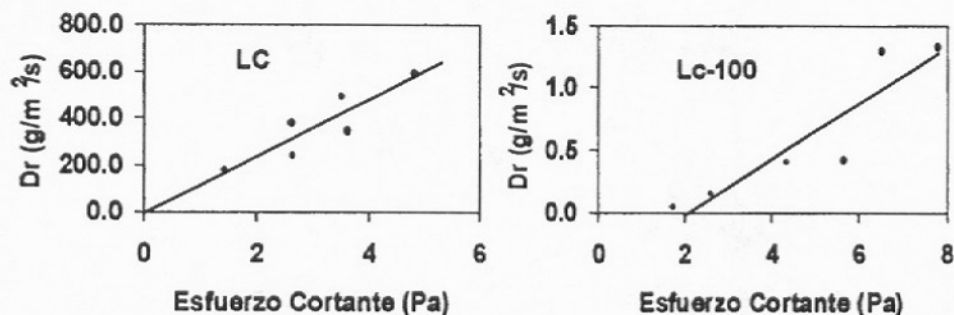


Figura 7.1. Tasa de desprendimiento en canalillos (Dr) con relación al esfuerzo hidráulico cortante para los sistemas de Labranza Convencional (LC) y Labranza Cero con 100 por ciento de cobertura (Lc-100) en Ajuno, Mich. 1998.

La desigualdad en la respuesta a Dr se debe a que LC se requiere un menor esfuerzo crítico cortante (τ_c), para producir altas tasas de desprendimiento de partículas de suelo. Es importante recordar que τ_c es el valor del intercepto de la línea de ajuste y representa la energía del flujo necesaria para iniciar el desprendimiento de sedimento. En este caso los valores de τ_c fueron 0.032 Pa para LC y 2.1 Pa para Lc-100; lo cual indica la susceptibilidad del suelo de LC a la erosión acanalada.

Los valores del desprendimiento en canalillos registran al suelo de Lc-100, como un suelo mucho más consolidado capaz de resistir un mayor esfuerzo

cortante del flujo, lo cual indica un desarrollo estructural de agregados con el paso del tiempo. Tal condición es muy deseable dada la baja consolidación de los suelos de Ando de la cuenca de Pátzcuaro. Los valores de los parámetros de la erosión laminar y acanalada se muestran en la Tabla 7.2.

Tabla 7.2 Valores de los parámetros de erodabilidad para Labranza convencional (LC) y Labranza Cero con 100 por ciento de cobertura (Lc-100). Ajuno, Mich. 1998.

	LC	Lc-100
<i>Condición seca</i>		
K_i (kg s ⁻¹ m ⁻⁴)	1'262,608.0	2,552.0
K_r (s m ⁻¹)	0.083	0.0002
τ_c (Pascales)	0.032	2.1
<i>Condición húmeda</i>		
K_i (kg s ⁻¹ m ⁻⁴)	3'113,579.0	19,271.0

7.8 Conductividad Hidráulica Saturada (K_s).

En la Figura 7.2 se muestran las curvas de infiltración ajustadas mediante la ecuación de Green-Ampt; asimismo, se presenta la regresión lineal para el cálculo de los parámetros de Green-Ampt mediante el método de mínimos cuadrados. Al inicio de la simulación, la tasa de infiltración es alta en ambos tratamientos; sin embargo, Lc-100 mantiene una mayor infiltración a través de la simulación en comparación con LC, donde la velocidad de infiltración disminuye rápidamente. Este fenómeno está directamente relacionado con el escurrimiento producido, es decir, si un tratamiento de laboreo provee mayor infiltración el escurrimiento tiende a disminuir, tal es el caso de Lc-100.

Los suelos de Ajuno sujetos a la labranza convencional y bajo las condiciones de saturación están más propensos a un mayor escurrimiento superficial a consecuencia de una conductividad hidráulica baja. En este estudio se identificó que la conductividad hidráulica saturada (K_s) bajó a 5.4 mm hr^{-1} con laboreo convencional en comparación con 59.8 mm hr^{-1} obtenidos con labranza cero con mantillo de residuos. Esto indica un posible taponamiento de los microporos del suelo que ocurre durante los primeros minutos de la lluvia ocasionado por las partículas de sedimento desprendidas por erosión laminar.

La Tabla 7.3 presenta los valores de los parámetros de infiltración aplicando la ecuación de Green-Ampt encontrados para los tratamientos estudiados bajo las condiciones seca y húmeda. En este análisis, la relevancia de la magnitud de la conductividad hidráulica (K_s), es que este parámetro está relacionado de manera directa con la capacidad del suelo para captar un mayor volumen de lluvia en un menor tiempo, así el tratamiento Lc-100 presentó una mayor K_s en comparación con LC. Esto representa la efectividad de los suelos para capturar el agua de las tormentas de alta intensidad y corta duración, y hace evidente que las diferencias encontradas en los valores de K_s con simulación de lluvia se atribuyen al manejo de suelo.

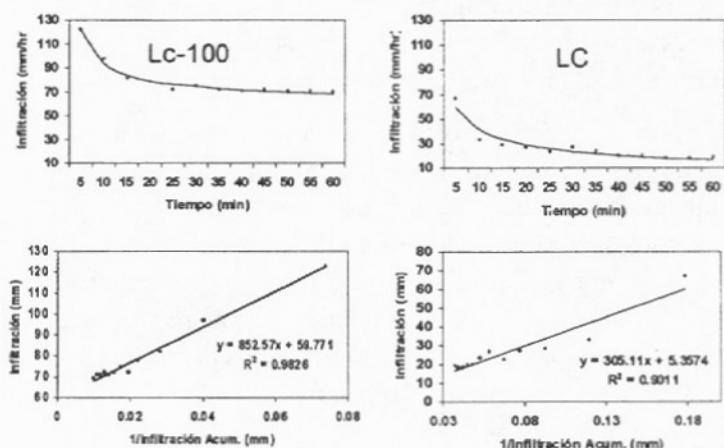


Figura 7.2 Tasa de infiltración y su ajuste al modelo de Green-Ampt para Labranza Cero con 100% cobertura (Lc-100) y Labranza Convencional (LC). Ajuno, Mich. 1998.

Tabla 7.3. Parámetros de infiltración para el modelo de Green-Ampt para Labranza cero-100 por ciento de cobertura (Lc-100) y Labranza Convencional (LC) en Ajuno, Mich. 1998.

Tratamiento de labranza	K_s (mm hr ⁻¹)	MS (mm)	R ²
<i>Simulación en seco</i>			
Lc-100	92.9	2.82	0.95
LC	17.4	39.72	0.90
<i>Simulación en húmedo</i>			
Lc-100	59.7	14.26	0.98
LC	5.3	56.50	0.91

La reducción de K_s bajo condiciones húmedas es una manifestación que la única la fuerza dominante en el movimiento del agua en el suelo es la gravedad, mientras que las tasas rápidas de infiltración durante la fase seca de la simulación es en gran parte dominada por fuerzas capilares, tensión superficial y de gravedad. Estos resultados son de gran importancia para entender que el mejoramiento de la infiltración es atribuible a un cambio en la estructura del suelo y al incremento de la paja sobre el suelo que detiene el escurrimiento superficial.

La importancia de este estudio es la parameterización de modelos que contienen parámetros con significado físico y, por lo tanto, pueden estimarse indirectamente en función de las características del suelo. Esto es factible tomando en cuenta que los parámetros de erodabilidad e infiltración son propiedades intrínsecas del suelo y que pueden utilizarse para una caracterización edáfica. Este procedimiento ha permitido modelar la hidrología del Lago de Pátzcuaro para identificar tecnología para el manejo de suelos para ser aplicada en las áreas que más han sufrido el proceso de la erosión.