



# **COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

**CAMPUS MONTECILLO**

**POSTGRADO DE HIDROCIENCIAS**

**RELACIÓN PRECIPITACIÓN-ESCURRIMIENTO PARA  
DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO DEL SUELO**

**RAMÓN LEÓN CANACA CALDERÓN**

**TESIS**

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**MAESTRO EN CIENCIAS**

**MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO**

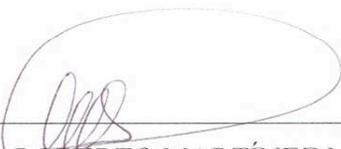
**2008**

La presente tesis, titulada: **Relación precipitación-escurrimiento para diferentes sistemas de manejo del suelo**, realizada por el alumno: **Ramón León Canaca Calderón**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

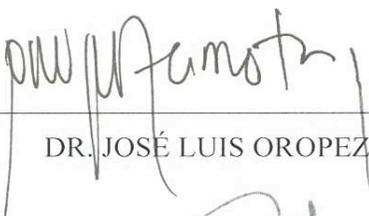
**MAESTRO EN CIENCIAS  
HIDROCIENCIAS**

**CONSEJO PARTICULAR**

CONSEJERO:

  
\_\_\_\_\_  
DR. MARIO ROBERTO MARTÍNEZ MENES

ASESOR:

  
\_\_\_\_\_  
DR. JOSÉ LUIS OROPEZA MOTA

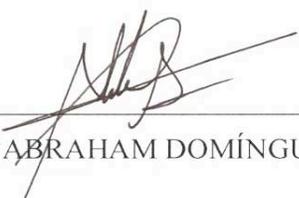
ASESOR:

  
\_\_\_\_\_  
DR. NÉSTOR FRANCISCO NICOLÁS

ASESOR:

  
\_\_\_\_\_  
M. C. JOSÉ DONALDO RÍOS BERBER

ASESOR:

  
\_\_\_\_\_  
M. C. ABRAHAM DOMÍNGUEZ ACEVEDO

Montecillo, Texcoco, Estado de México, mayo de 2008

# RELACIÓN PRECIPITACIÓN-ESCURRIMIENTO PARA DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO DEL SUELO

Ramón León Canaca Calderón, M. C.

Colegio de Postgraduados, 2008

Se evaluó la relación precipitación-escorrimento en diferentes sistemas de manejo del suelo en el cultivo de maíz en dos regiones de la República Mexicana: la localidad de Ajuno, municipio de Pátzcuaro, Michoacán y la localidad Vistahermosa, municipio de San Andrés Tuxtla, Veracruz. Se utilizaron bases de datos de precipitación y escurrimento para los meses de junio a octubre del periodo de 1996-2001, cuyos datos fueron obtenidos en lotes de escurrimento de 22.9 m x 4 m con pendiente de 10% para Ajuno y de 25 m x 2 m con 16% de pendiente para Vistahermosa. Se analizaron los factores que inciden en los escurrimentos superficiales como son las propiedades hidrológicas del suelo, condición hidrológica asociada a la cobertura vegetal, uso de suelo y contenido de humedad antecedente. También se estudio la variación multitemporal de los coeficientes de escurrimento y de las curvas numéricas mediante los métodos de precipitación-escorrimento y de pares ordenados con abstracciones iniciales de 0.05S y 0.2S. Los resultados muestran que no existen cambios considerables en las propiedades del suelo, a pesar de estar sometidos a los procesos de laboreo del suelo, como es el caso de la labranza convencional (LC). En Vistahermosa se presentaron los mayores escurrimentos, los valores más altos de los coeficientes de escurrimento y curvas numéricas en diferentes escalas temporales, esto asociado a la mayor cantidad de lluvia, mayor grado de pendiente y suelos con mayor potencial de escurrimento. Los sistemas con residuos de cosecha mostraron los menores escurrimentos, tal es el caso de la labranza cero con 100% de residuos (L0 100%) que presentó una eficiencia superior a 51% en la reducción del escurrimento en comparación con la labranza convencional. Asimismo, mediante el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) se observó que el uso de la abstracción inicial ( $I_a$ ) de 0.05S presentó una mejor bondad de ajuste entre los escurrimentos observados y los estimados a través del método de curvas numéricas.

Palabras clave: propiedades hidrológicas, multitemporal, coeficiente, curva numérica, abstracción inicial.

# RELATION PRECIPITATION-RUNOFF FOR DIFFERENTS SOIL TILLAGE SYSTEMS

Ramón León Canaca Calderón, M. C.

Colegio de Postgraduados, 2008

The relation was evaluated precipitation-runoff in different soil tillage and soil management for the maize in two regions of the Mexican Republic: the locality of Ajuno, Pátzcuaro, Michoacán and the Vistahermosa locality, San Andres Tuxtla, Veracruz. In order to develop this work the data bases of precipitation and runoff for the months of June to October of the period of 1996-2001 were used, whose data were collected from runoff plots of 22.9 m x 4 m with slope of 10% for Ajuno and 25 m x 2 m with 16% of slope for Vistahermosa. The factors were analyzed that affect the runoff as they are the hydrologic properties of the soil, hydrologic condition associated to the vegetal cover, soil management and antecedent moisture content. Also, the multitemporal variation of the runoff coefficients and curve numbers by means of precipitation-runoff and rank-order methods was studied with initials abstractions of 0.05S y 0.2S. The results show that considerable changes in the properties of soil do not exist, in spite of being put under soil tillage processes, as is the case of the conventional till. In Vistahermosa the highest runoff appeared, the highest values of the runoff coefficients and curve numbers in the different temporary scales, associated to the greater amount of rain, high slope degree and soils with high potential of runoff. The systems with residue cover, showed the lowest runoff, so is the case of No till with 100% of residues (L0 100%) that an efficiency presented superior to 51% in the reduction of the runoff in comparison with the conventional till (LC). Also, it was observed by means of the determination coefficient ( $R^2$ ) that the use of the initial abstraction of 0.05S presented the best fit adjustment between the observed and estimated runoff.

Keywords: hydrologic properties, multitemporal, coefficient, curve number, initial abstraction.

## AGRADECIMIENTOS

A **Dios** por estar siempre conmigo, aún cuando me he alejado de su camino. Por ser un Dios misericordioso, lleno de amor, que me ha brindado sabiduría y entereza para dar un pequeño paso más en mi vida.

A la **Secretaría de Relaciones Exteriores del Gobierno de México**, por el apoyo económico otorgado para realizar mis estudios de maestría.

Al **Centro Nacional de Producción Sostenible (CENAPROS)** de Michoacán y al **Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias (INIFAP)**, campo experimental Cotaxtla, Veracruz por facilitarme las bases de datos que hicieron posible la realización de este trabajo.

A mi consejero y director de tesis, **Dr. Mario Martínez Menes** y a mis asesores, **Dr. José Luis Oropeza**, **M. C. José D. Ríos Berber**, **M. C. Abraham Domínguez Acevedo** y **Dr. Néstor Francisco Nicolás** por brindarme su amistad, tiempo y comentarios acertados que contribuyeron a mejorar el presente trabajo.

A mis padres, **María Emilia y Ramón León**, por brindarme su amor, apoyo y de quienes estaré agradecido por siempre. Son un ejemplo a seguir.

A mi hermano **José** y en especial a mis hermanas, **Paty y Karina**, quienes fueron un pilar importante en los momentos más difíciles que atravesamos como familia y que gracias a ustedes, mi hermano y yo pudimos culminar nuestros estudios universitarios. Muchas gracias hermanas.

A **Graciela, Doña Zulma y Don Paco**, por estar pendientes de mí, brindarme su amistad, abrirme las puertas de su casa y aceptarme como un miembro más de su familia.

A mis amigos **Luz, Linda, Raúl, Claudia, Carlos, Mireya, Carlitos, Dr. Miguel Águila** y **Ana** por su cariño y linda amistad, por los momentos compartidos, por su apoyo, consejos y porque me hicieron sentir como en casa. Gracias queridos amigos.

A los **profesores** del Colegio de Postgraduados, por transmitirme sus conocimientos, los que espero de alguna manera ponerlos en práctica y compartirlos con aquellos que me rodean.

A todo el personal de la biblioteca y de servicios académicos del Colegio de Postgraduados por darme su apoyo.

A todas aquellas personas de las que no hago mención, pero que siempre estarán presente en mi y han dejado una huella en lo que soy como persona.

## CONTENIDO

<b>LISTA DE CUADROS</b> .....	xi
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	xiii
<b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>II. REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....	3
2.1 Escurrimiento superficial (Q).....	3
2.1.1 Factores que afectan el escurrimiento .....	4
2.2 Precipitación (P).....	4
2.2.1 Características de la lluvia .....	5
2.2.2 Intensidad ( <i>I</i> ).....	5
2.2.3 Variabilidad espacial de la precipitación .....	6
2.3 Características del área de drenaje .....	6
2.3.1 Características morfométricas .....	7
2.3.1.1 Superficie y forma.....	7
2.3.1.2 Pendiente .....	7
2.3.2 Características físicas .....	8
2.3.2.1 Uso y cobertura del suelo.....	8
2.3.2.2 Características del suelo.....	10
2.3.2.3 Topografía .....	10
2.4 Modelos de formación del excedente de agua .....	10
2.5 Efecto de escala en el escurrimiento superficial .....	11
2.6 Estimación de escurrimientos.....	14
2.7 Método de curvas numéricas (CN).....	19
2.7.1 Bases del método de CN.....	20
2.7.2 Abstracción inicial ( $I_a$ ).....	20
2.7.3 Potencial máximo de retención de humedad (S) .....	22
2.8 Alternativas para la estimación de CN .....	25
2.8.1 Precipitación-escurrimiento .....	26
2.8.2 Método pares ordenados .....	26
2.9 Factores necesarios para estimar CN .....	28

2.9.1 Grupo hidrológico del suelo .....	28
2.9.2 Condición hidrológica o cobertura vegetal del terreno .....	28
2.9.3 Uso de suelo.....	28
2.9.4 Condición de humedad antecedente (CHA) .....	29
2.10 Factores que inciden en la determinación de CN.....	30
2.10.1 Tamaño de la muestra.....	30
2.10.2 Efecto del radio de abstracción inicial ( $\lambda$ ) .....	30
2.10.3 Método de estimación y rango de datos .....	31
2.11 Limitaciones del método de CN.....	31
2.12 Estudios realizados sobre la relación precipitación-escorrentía a través del método de CN en México .....	31
2.13 Modelos de simulación hidrológica .....	33
2.13.1 Calibración y validación de modelos.....	36
2.14 Conclusión de la revisión de literatura .....	37
<b>III. OBJETIVOS, HIPÓTESIS Y SUPUESTOS .....</b>	<b>39</b>
3.1 Objetivo general .....	39
3.2 Objetivos específicos.....	39
3.3 Hipótesis.....	39
3.4 Supuestos.....	39
<b>IV. MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>40</b>
4.1 Descripción de áreas de estudio .....	40
4.1.1 Suelos.....	40
4.1.2 Clima .....	42
4.2 Descripción de lotes de escorrentía y sistemas de manejo del suelo .....	43
4.2.1 Lotes de escorrentía.....	43
4.2.2 Sistemas de manejo del suelo .....	43
4.3 Medición de precipitación y escorrentía .....	44
4.3.1 Precipitación .....	44
4.3.2 Escorrentía.....	44
4.4 Análisis de suelo.....	45
4.5 Análisis de datos de precipitación y escorrentía .....	46

4.6	Análisis del coeficiente de escurrimiento.....	46
4.6.1	Modelo de grados día desarrollo .....	47
4.7	Descripción de las medidas de dispersión.....	48
4.8	Determinación de los elementos que intervienen en el método de CN.....	48
4.8.1	Condición de humedad antecedente (CHA) .....	48
4.8.2	Grupo hidrológico del suelo .....	48
4.8.3	Condición hidrológica .....	49
4.8.4	Uso de suelo.....	49
4.9	Obtención de CN.....	49
4.10.	Calibración entre los escurrimientos observados y estimados mediante el método de curvas numéricas de P-Q.....	50
4.11	Balance hídrico.....	50
4.11.1	Serie de Fourier .....	52
<b>V.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>54</b>
5.1	Variabilidad de las características de los suelos de los sitios analizados.....	54
5.2	Análisis de la precipitación en los dos sitios de estudio .....	60
5.2.1	Precipitación anual .....	60
5.2.2	Precipitación mensual.....	61
5.2.3	Precipitación por evento .....	63
5.3	Análisis de los escurrimientos por sistema de manejo del suelo para los dos sitios .....	65
5.3.1	Escurrecimiento anual .....	65
5.3.2	Escurrecimiento mensual .....	68
5.3.3	Escurrecimiento por evento de precipitación.....	70
5.4	Relación precipitación-escurrecimiento .....	71
5.5	Análisis de los coeficientes de escurrimiento por sistema de manejo del suelo .....	73
5.5.1	Coefficiente de escurrimiento anual .....	73
5.5.2	Coefficiente de escurrimiento mensual.....	76
5.5.3	Variación del coeficiente de escurrimiento respecto al desarrollo de follaje del cultivo .....	77
5.5.4	Coefficiente de escurrimiento por evento .....	79
5.6	Análisis de Curvas Numéricas por sistema de manejo del suelo .....	84

5.6.1 Curvas numéricas estimadas mediante el método de P-Q .....	84
5.6.1.1 Variabilidad de CN .....	87
5.6.1.2 Curvas numéricas asociadas con la cobertura vegetal .....	88
5.6.1.3 Curvas numéricas asociadas a los contenidos de humedad del suelo y condición de humedad antecedente .....	90
5.6.2 Método pares ordenados .....	92
5.7 Bondad de ajuste entre los escurrimientos observados y estimados .....	96
5.8 Balance hídrico .....	99
<b>VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>103</b>
6.1 Conclusiones .....	103
6.2 Recomendaciones .....	104
<b>VII. LITERATURA CITADA .....</b>	<b>105</b>
<b>VIII. ANEXOS .....</b>	<b>115</b>

## LISTA DE CUADROS

<b>Cuadro 1.</b> Características de la lluvia y eventos de escurrimiento medidos en tres sitios de monitoreo en Normandía, Francia. ....	12
<b>Cuadro 2.</b> Coeficientes de escurrimiento para diferentes usos de suelo y grupo hidrológico del suelo. ....	16
<b>Cuadro 3.</b> Coeficiente de escurrimiento para diferentes usos de suelo, grado de pendiente y textura del suelo. ....	17
<b>Cuadro 4.</b> Coeficientes de escurrimiento para diferentes tipos de superficie, pendiente y periodos de retorno de precipitación. ....	18
<b>Cuadro 5.</b> Resultados del valor del radio de abstracción inicial ó $\lambda$ . ....	22
<b>Cuadro 6.</b> Valor del potencial máximo de retención de humedad (S) para cada valor de curva numérica (CN). ....	22
<b>Cuadro 7.</b> Selección de CN <sub>1</sub> , CN <sub>2</sub> o CN <sub>3</sub> en base a la precipitación acumulada cinco días previos al evento de estudio. ....	29
<b>Cuadro 8.</b> Valores de CN obtenidos en diferentes sistemas de labranza y uso de suelo en México. ....	33
<b>Cuadro 9.</b> Propiedades del suelo para diferentes sistemas de manejo del suelo en el sitio 1. ....	55
<b>Cuadro 10.</b> Propiedades del suelo para diferentes sistemas de manejo en el sitio 2. ....	58
<b>Cuadro 11.</b> Variación temporal de la precipitación (en mm) en los sitios de estudio. ....	62
<b>Cuadro 12.</b> Análisis de la precipitación (en mm) por evento en los sitios de estudio. ....	63
<b>Cuadro 13.</b> Análisis de la precipitación (en mm) por evento agrupado en forma mensual para los sitios de estudio. ....	65
<b>Cuadro 14.</b> Variabilidad de los escurrimientos medios anuales en los dos sitios de estudio. ....	67
<b>Cuadro 15.</b> Variabilidad de los escurrimientos superficiales por evento en los dos sitios de estudio. ....	70
<b>Cuadro 16.</b> Variabilidad del coeficiente de escurrimiento medio anual en los dos sitios de estudio durante el periodo 1996-2001. ....	74
<b>Cuadro 17.</b> Coeficiente de escurrimiento medio mensual en base a desarrollo y cobertura del follaje del cultivo de maíz en el sitio 1. ....	78
<b>Cuadro 18.</b> Coeficiente de escurrimiento medio mensual en base a desarrollo y cobertura del follaje del cultivo de maíz en el sitio 2. ....	79

<b>Cuadro 19.</b> Variación del coeficiente de escurrimiento por evento para los sitios de estudio. ...	80
<b>Cuadro 20.</b> Curvas numéricas estimadas y proyectadas para diferentes condiciones de humedad antecedente, sistema de manejo y sitio de estudio. ....	84
<b>Cuadro 21.</b> Variabilidad de CN por sistema de manejo del suelo para los sitios 1 y 2 con $\lambda = 0.05$ . ....	87
<b>Cuadro 22.</b> Valores promedios mensuales de CN asociadas con cobertura vegetal para el sitio 1. ....	88
<b>Cuadro 23.</b> Valores de CN para las tres condiciones de humedad antecedente para diferentes sistemas de manejo del suelo en los dos sitios de estudio. ....	91
<b>Cuadro 24.</b> Coeficiente de determinación ( $R^2$ ) para diferentes sistemas de manejo del suelo mediante el método de curvas numéricas P-Q en el sitio 1. ....	96
<b>Cuadro 25.</b> Coeficiente de determinación ( $R^2$ ) para los sistemas de manejo del suelo en el sitio 2 mediante el método P-Q de curvas numéricas. ....	97

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Diagrama del escurrimiento e hidrograma. ....	4
<b>Figura 2.</b> Curvas numéricas (CN) o relación entre escurrimiento-precipitación .....	19
<b>Figura 3.</b> Comportamiento de CN según cantidad de lluvia.....	26
<b>Figura 4.</b> Ubicación de los sitios de estudio. ....	41
<b>Figura 5.</b> Sistema de aforo de escurrimientos superficiales en el sitio 1. ....	45
<b>Figura 6.</b> Porcentaje de MO en el suelo según los residuos de cosecha para el sistema de manejo L0 en el sitio 1.....	56
<b>Figura 7.</b> Distribución anual de la precipitación durante el periodo 1996-2001 en los dos sitios de estudio. ....	61
<b>Figura 8.</b> Distribución de la precipitación en forma mensual para los dos sitios de estudio. ....	62
<b>Figura 9.</b> Precipitación por evento para los sitios en estudio.....	63
<b>Figura 10.</b> Frecuencia relativa de la precipitación en los sitios de estudio.....	64
<b>Figura 11.</b> Efecto de los sistemas de manejo en la producción de escurrimientos en los sitios de estudio. ....	66
<b>Figura 12.</b> Escurrimiento medio anual por sistema de manejo en los dos sitios de estudio. ....	67
<b>Figura 13.</b> Escurrimiento acumulado para distintos sistemas de manejo en los sitios de estudio. ....	68
<b>Figura 14.</b> Escurrimiento medio mensual para diferentes sistemas de manejo en los sitios de estudio. ....	69
<b>Figura 15.</b> Relación precipitación – escurrimiento para diferentes sistemas de manejo del suelo para el sitio 1. ....	72
<b>Figura 16.</b> Relación precipitación – escurrimiento para los sistemas de manejo de suelo LC y L0 100% del sitio 2. ....	72
<b>Figura 17.</b> Coeficiente de escurrimiento medio anual por sistema de manejo en los sitios de estudio. ....	73
<b>Figura 18.</b> Rango de variación del coeficiente de escurrimiento por sistema de manejo del suelo en los sitios de estudio. ....	75
<b>Figura 19.</b> Coeficiente de escurrimiento medio mensual para diferentes sistemas de manejo del suelo en los dos sitios de estudio. ....	76

<b>Figura 20.</b> Comportamiento del coeficiente de escurrimiento por sistema de manejo del suelo para el sitio 1.....	82
<b>Figura 21.</b> Comportamiento del coeficiente de escurrimiento por evento para el sitio 2.....	83
<b>Figura 22.</b> Frecuencia relativa del coeficiente de escurrimiento en los sitios de estudio.....	83
<b>Figura 23.</b> Valor de CN respecto a la incorporación de residuos de cosecha en el sistema de manejo de labranza cero para los radios de abstracción 0.05 y 0.20 para el sitio 1.....	86
<b>Figura 24.</b> Comportamiento de CN promedio mensual. a) Asociadas con la cobertura del follaje b) Asociada con la cobertura del follaje y residuos de cosecha.....	89
<b>Figura 25.</b> Comportamiento de CN promedio mensual en el sitio 2. ....	90
<b>Figura 26.</b> Comportamiento de CN a través del método de pares ordenados para el sitio 1.....	94
<b>Figura 27.</b> Comportamiento de CN a través del método de pares ordenados para el sitio 2.....	95
<b>Figura 28.</b> Escurrimiento observado y escurrimiento estimado para los sistemas de manejo L0 100% y LC por medio del método de curvas numéricas de P-Q con abstracción inicial de 0.05S en el sitio 2.....	97
<b>Figura 29.</b> Escurrimiento observado y escurrimiento estimado para diferentes sistemas de manejo del suelo por medio del método de curvas numéricas de P-Q con abstracción inicial de 0.05S en el sitio 1.....	98
<b>Figura 30.</b> Balance hídrico del sistema de LC del sitio 1 para los meses de junio a octubre (año de 1996). ....	100
<b>Figura 31.</b> Balance hídrico del sistema de LC del sitio 2 para los meses de junio a octubre (año de 1996). ....	102

## I. INTRODUCCIÓN

En la planeación y manejo de los recursos hídricos se requiere información de precipitación y escurrimiento, para con ello determinar el volumen de agua a almacenar, el diseño de obras de excedencia hidráulica y la eficiencia hidrológica de las obras y prácticas de conservación de los recursos naturales. La información de precipitación y escurrimiento como proceso hidrológico en pequeñas cuencas es difícil de obtener, así como medir los flujos superficiales a nivel de sitio, e implica un alto costo económico, además de requerir infraestructura y recursos humanos (Francisco, 2005). Una alternativa viable para reducir costos y ahorrar tiempo resulta el uso de modelos hidrológicos e hidráulicos, los cuales a partir de datos puntuales de precipitación y parámetros de suelo y vegetación permiten predecir los escurrimientos superficiales medios ó máximos para un evento recurrente o extremo.

Los modelos hidrológicos han sido desarrollados con el fin de estimar los escurrimientos superficiales en diferentes condiciones naturales y para evaluar la eficiencia de las obras y prácticas de conservación del suelo y agua en la reducción de escurrimientos y erosión, así como aumentar la recarga de acuíferos. Estos modelos se basan en el uso de coeficientes de escurrimientos y curvas numéricas, cuyos valores dependen del tipo de suelo, vegetación, pendiente del terreno, prácticas de manejo, uso del suelo y de las condiciones de humedad antecedente al evento en estudio. A partir de estos parámetros, se consultan los valores tabulados disponibles y se seleccionan los coeficientes de escurrimientos o curvas numéricas; que ponderados a nivel de área de drenaje o cuenca y con datos de precipitación se pueden estimar los escurrimientos superficiales.

Los modelos como el SWRRB (Simulator for Water Resources in Rural Basins, por sus siglas en inglés) (Arnold *et al.*, 1990), EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator) (Williams, 1991) y SWAT (Soil and Water Assessment Tool) (Arnold *et al.*, 1994) entre otros, incorporan en sus rutinas de procesos hidrológicos la simulación del escurrimiento superficial utilizando el método de curvas numéricas (Simanton *et al.*, 1973; Ponce y Hawkins, 1996). El método de curvas numéricas ha sido muy criticado por ser considerado una metodología simple

para simular un proceso hidrológico complejo (Hong *et al.*, 2006), ya que utiliza parámetros predeterminados y obtenidos para condiciones diferentes a las que se va aplicar y es difícil encontrar valores de curvas numéricas con variación multitemporal, calibradas y validadas a nivel local. Sin embargo, sigue siendo una herramienta de mucha utilidad para estimar los escurrimientos superficiales bajo diferentes escenarios en cuencas poco o no instrumentadas.

Considerando lo anterior, se planteó este trabajo con el objetivo de valorar la variabilidad temporal de los coeficientes de escurrimientos y curvas numéricas en dos sitios experimentales, donde se cuantificaron los escurrimientos superficiales bajo diferentes sistemas de manejo del suelo.

Los resultados obtenidos son valores multitemporales de curvas numéricas y coeficientes de escurrimientos para diferentes tipos y manejo de suelo y condiciones climáticas, lo que permitirá presentar información local que pueda alimentar a los modelos hidrológicos tan utilizados para valorar los impactos de las obras y prácticas de conservación del suelo.

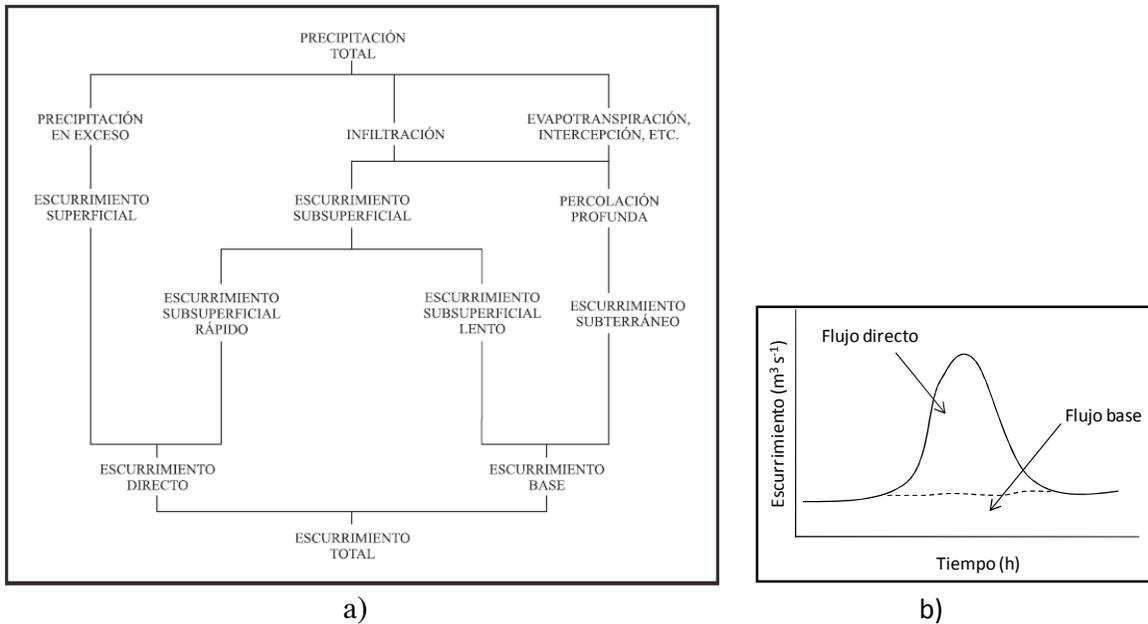
## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1 Escurrimiento superficial (Q)

Es un fenómeno que ocurre cuando la intensidad de la lluvia es mayor que la capacidad de infiltración del agua en el suelo y cuando se han llenado las depresiones superficiales del terreno. El agua en exceso se acumula como una lámina delgada y escurre en dirección de la pendiente. (Woolhiser *et al.*, 1990).

Una vez que se genera el escurrimiento, éste se mueve sobre la superficie del suelo y converge alrededor del micro relieve, propiciado por la rugosidad del terreno como producto de las piedras, terrones, vegetación y prácticas de manejo del suelo (Velásquez, 2006). Según Elsenberg (2001), las rutas del movimiento del agua en una vertiente, después de un evento de lluvia, son controladas por las características del terreno, del suelo y de la cobertura vegetal.

Los escurrimientos varían en el tiempo y a lo largo de la ladera. Mientras no llueva, el movimiento del agua dentro del suelo tiene principalmente dirección vertical y una pequeña componente lateral, esto debido a la diferencia de conductividad hidráulica en el perfil. Durante la lluvia, la situación cambia, siendo la dirección dominante de tipo lateral (Hernández, 2005). En la Figura 1 se presenta un diagrama de los tipos de escurrimiento como producto de la precipitación (a) así como hidrograma (b) con flujo base y flujo directo, este último originado por la precipitación.



**Figura 1. Diagrama del escurrimiento e hidrograma.** (disponible en línea en <http://www.diplomado-sig.igeograf.unam.mx/instituto/publicaciones/libros/hidrogeografia/cp5.pdf>.) (consultada el 5 de mayo de 2007)

### 2.1.1 Factores que afectan el escurrimiento

Existen dos grupos de factores que afectan los escurrimientos superficiales:

- Características de la lluvia
- Características del área de drenaje

Dentro de las características de la lluvia se tiene la cantidad, duración y distribución tanto espacial como temporal; mientras que, dentro de las características del área de drenaje se tienen los factores morfométricos y factores físicos (Díaz *et al.*, 2006).

## 2.2 Precipitación (P)

Es uno de los componentes primarios del ciclo hidrológico. Cuando el agua en estado líquido o sólido llega al suelo, se dice que ha precipitado. Esta se produce cuando el aire se eleva

y se enfría adiabáticamente por debajo del punto de rocío, con tal rapidez que no solo se forman las nubes, sino que también se produce lluvia, nieve o granizo (Díaz *et al.*, 2006).

### 2.2.1 Características de la lluvia

La distribución espacial de la precipitación es generalmente de poca importancia en el análisis de parcelas o cuencas de poco tamaño ya que se asume que la cantidad de lluvia es uniforme en toda el área de drenaje, en tanto que la variación temporal en cantidad y duración de la precipitación son muy importantes para los análisis hidrológicos y pueden combinarse para describir las curvas de intensidad – duración – frecuencia; de mucha utilidad para estimar los escurrimientos medios y máximos provocados por una tormenta (Hayes y Young, 2006).

### 2.2.2 Intensidad (*I*)

Oropeza (1977) define la intensidad de la lluvia como la rapidez de cambio de la cantidad de agua caída con respecto al tiempo y se expresa por medio de la siguiente relación:

$$I = \frac{\Delta P}{\Delta t} \times 60 \quad (1)$$

Donde:

- I = intensidad de la lluvia (mm h<sup>-1</sup>)
- $\Delta P$  = lámina de la lluvia acumulada (mm)
- $\Delta t$  = tiempo de duración de la lluvia (min)
- 60 = factor de conversión de minutos a hora (h)

Cuando ocurren eventos de alta intensidad, se puede generar mayor escurrimiento superficial, en cambio cuando la intensidad de la lluvia es menor, permite que mayor cantidad de agua pueda infiltrarse y llegar a formar parte del flujo subsuperficial y agua subterránea, lo que indica que el escurrimiento es proporcional a la intensidad y a su variación en el tiempo. Los cambios en intensidad de la lluvia en el evento impactan en los escurrimientos ya que

intensidades altas al inicio del evento reportan menores escurrimientos que altas intensidades al final del evento.

Arnaez *et al.* (2007) simularon 22 eventos de precipitación con intensidades de  $30 \text{ mm h}^{-1}$  hasta  $117.5 \text{ mm h}^{-1}$  en lotes de escurrimientos colocados en viñedos sembrados en hileras en terrenos con pendiente media de 7%. Los valores de escurrimiento superficial variaron de  $7.2 \text{ mm h}^{-1}$  para intensidades bajas ( $30 \text{ mm h}^{-1}$ ) y un periodo de retorno de 2 años a escurrimientos de  $41.9 \text{ mm h}^{-1}$  para lluvias simuladas de  $104 \text{ mm h}^{-1}$ , correspondientes a un periodo de retorno de 68 años.

### **2.2.3 Variabilidad espacial de la precipitación**

Si bien es cierto que la cantidad, duración y distribución temporal de la precipitación son importantes para la estimación de los escurrimientos, la variabilidad espacial de la precipitación en las cuencas hidrológicas ha representado uno de los grandes problemas para alimentar a los modelos hidrológicos. Esto se debe a que en la mayor parte de los casos se utilizan valores medios ponderados que parten de observaciones puntuales que no definen con claridad el área de influencia de cada sitio de observación. Debido a esto, la variación espacial de la precipitación ha tratado de minimizarse utilizando las medias aritméticas simples, las isoyetas o los polígonos de Thiessen.

## **2.3 Características del área de drenaje**

- Características morfométricas: son las particularidades de las formas terrestres como la superficie, forma y pendiente
- Características físicas: Se refiere a las características físicas del terreno con su estructura y utilización (uso y cubierta del suelo, características del suelo y topografía)

(URL:<http://www.diplomadosig.igeograf.unam.mx/instituto/publicaciones/libros/hidrogeografia/cp5.pdf>)

## **2.3.1 Características morfométricas**

### **2.3.1.1 Superficie y forma**

En general, el volumen de escurrimiento se incrementa con el área de drenaje. Para un mismo evento de precipitación, una cuenca alargada presenta volúmenes escurridos más uniformes a través del tiempo en comparación con cuencas más compactas o circulares de similar área (Hayes y Young, 2006).

### **2.3.1.2 Pendiente**

Hudson (1995) establece que el gradiente de la pendiente es uno de los factores considerados en métodos empíricos para la estimación de escurrimientos, en donde se asume que al incrementar el ángulo de pendiente, puede generarse mayor escurrimiento. Sin embargo, los resultados de campo que describen el efecto de la pendiente en el escurrimiento son contradictorios (Fox *et al.*, 1997; Chaplot y Le Bissonais, 2000). En algunos casos el escurrimiento se incrementa (Sharman *et al.*, 1983); en otros decrece (Poesen, 1984) o no es significativamente diferente (Mah *et al.*, 1992) con el incremento de la pendiente. Estas discrepancias pueden ser explicadas por la variabilidad que se presenta en condiciones experimentales (Fox *et al.*, 1997).

Warrington *et al.* (1989) reportaron un rápido incremento de la erosión con pendientes mayores a 10%, pero el aumento fue poco con pendientes entre 25% y 30%, lo cual se atribuye a la capacidad de remoción y de transporte de partículas del suelo por el flujo superficial. Joel *et al.* (2002) establecen que el efecto del grado de pendiente debería ser examinado en relación a otros parámetros, como la cobertura vegetal, depresiones de la superficie, rugosidad y estabilidad de los agregados.

## 2.3.2 Características físicas

### 2.3.2.1 Uso y cobertura del suelo

Se han hecho muchas investigaciones respecto al efecto de la cobertura vegetal sobre los escurrimientos.

Macías (1992) estimó la relación precipitación-escurrimiento en lotes de 50 m<sup>2</sup> y 1.8% de pendiente para diversos tratamientos en el campo experimental Lomas de San Juan, que pertenece a la Universidad Autónoma Chapingo. Los coeficientes de escurrimiento (C) reportados variaron de 0.10 para labranza convencional sin cultivo y residuos de cosecha, 0.20 para labranza cero con maíz, hasta 0.30 y 0.31 para la labranza convencional con maíz y sin cultivo, respectivamente. Medard (1994) encontró coeficientes de escurrimiento de 0.43 y 0.0027 para el cultivo de frijol durante dos años en microcuencas de 6000 m<sup>2</sup> aproximadamente. Estas diferencias en los coeficientes, dicho autor las atribuye a la variabilidad de la precipitación y al uso de variedades con distinto hábito de crecimiento.

Gresillon (1994) aplicó una lluvia de 196 mm h<sup>-1</sup> de intensidad durante 2 h en una parcela con bosque, obteniendo un escurrimiento de 16 mm (coeficiente de escurrimiento igual a 0.041). Repitió la simulación, después de remover toda la vegetación, inclusive las raíces y una intensidad de 134 mm h<sup>-1</sup>, generándose un escurrimiento de 124 mm (coeficiente de escurrimiento igual a 0.93). Durante el año de 1996, Tapia-Vargas *et al.* (2000) evaluaron los escurrimientos en lotes con prácticas de manejo de suelo en la estación experimental de Ajuno, Michoacán, encontrando coeficientes de escurrimiento anuales de 0.13 para suelo desnudo, de 0.12 para labranza convencional con maíz y de 0.03 para lotes con cero labranza e incorporación de 33% y 100% de residuos de cosecha.

En Queensland, Australia, Carroll *et al.* (2000) evaluaron el impacto de la cobertura del suelo y el grado de pendiente en el escurrimiento superficial y pérdida de suelo en lotes de escurrimiento con suelo y material de minas. Para ello utilizaron lotes de escurrimiento con pendientes de 10, 20 y 30%, sembrados con pasto y árboles, encontrando una drástica reducción en el escurrimiento y movimiento de sedimentos una vez que el pasto se estableció. En

condiciones de suelo desnudo, con 20% de pendiente y para 4 años de medición, se obtuvo un coeficiente de escurrimiento promedio de 0.4, en suelo con cobertura vegetal de pasto y árboles el coeficiente de escurrimiento se redujo a 0.09, 0.10 y 0.12 para pendientes de 10, 20 y 30, respectivamente, lo que indica la eficiencia de la vegetación y de la pendiente para reducir el escurrimiento.

Ramírez y Oropeza-Mota (2001) utilizaron tres tratamientos (sistema tradicional como testigo, barrera viva de cocuite con surcado al contorno y labranza de conservación con 3 t ha<sup>-1</sup> de residuos de maíz) en la Frailesca, Chiapas, para evaluar la eficiencia en el control de erosión y escurrimiento durante los años de 1996 y 1997. El testigo presentó el mayor coeficiente de escurrimiento anual en promedio (0.28) y la mayor cantidad de suelo perdido; en cambio para los otros tratamientos dicho coeficiente fue de 0.18 y 0.17, respectivamente.

Medina (2006) en Morelia, Michoacán, comparó las pérdidas de suelo y coeficientes de escurrimiento para tres sistemas de labranza (año y vez con descanso de un año, labranza tradicional maíz + frijol y tratamiento mejorado maíz + frijol + residuos) en lotes de 20 m x 50 m, encontrando valores anuales de C iguales a 0.11, 0.03 y 0.02, respectivamente.

Trabajos como los que reportan Lal (1991) y Tebrügge y Böhrnsen (1997) establecen que el impacto de la labranza convencional afecta las propiedades del suelo como es la agregación, porosidad, infiltración, conductividad hidráulica y favorece procesos como erosión, formación de costra, compactación y lixiviación entre otras.

Como se aprecia en este apartado, al igual que la gran cantidad de trabajos realizados para determinar C, así es la alta variabilidad de este parámetro entre uno y otro estudio. Esto se debe a que el coeficiente de escurrimiento únicamente se encuentra en función de P y Q, y no se consideran otros factores que tienen una influencia directa en los escurrimientos.

### **2.3.2.2 Características del suelo**

Las propiedades del suelo determinan el grado de infiltración y almacenamiento del agua en el suelo. La textura, estructura y el contenido de materia orgánica establecen la porosidad y el tamaño de poros. Suelos con alto contenido de limos y arcillas tienen una alta porosidad pero con poros de tamaño pequeño y presentan un potencial capilar alto cuando se encuentran secos, pero cuando se humedecen, la expansión de arcillas y coloides cierran las fracturas y grietas, haciendo que el agua circule por poros de tamaño muy reducido, lo que limita considerablemente la capacidad de infiltración; de ahí que, entre más poroso sea un suelo y menor contenido de material coloidal tenga, tendrá una mayor capacidad de infiltración, lo cual retardará la aparición del escurrimiento superficial (TRAGSA, 2003).

### **2.3.2.3 Topografía**

En este factor juegan un papel muy importante el relieve del terreno y rugosidad del mismo. Morgan *et al.* (1998) e Idowu *et al.* (2001) encontraron que la rugosidad tiene efectos muy importantes en los procesos de erosión y escurrimiento, ya que determina el volumen de agua que puede retenerse en la superficie y disminuye de manera importante la pérdida de suelo cuando las partículas se depositan en las depresiones superficiales. López-Sabater *et al.* (2002) mencionan que la rugosidad es la resistencia que presenta el suelo al flujo superficial. Johnson *et al.* (1979) al evaluar la rugosidad superficial encontraron que una superficie rugosa disminuyó el escurrimiento superficial en 77% respecto al observado sobre superficies lisas.

## **2.4 Modelos de formación del excedente de agua**

Teniendo en cuenta la relación existente entre la intensidad de la lluvia y la velocidad de infiltración, se pueden establecer dos modelos para explicar la formación del excedente de agua:

- Modelo de saturación: en zonas de clima templado húmedo con lluvias bien distribuidas, las precipitaciones suelen ser de baja intensidad pero de larga duración. El suelo puede llegar a saturarse debido a la cantidad de agua precipitada, dando lugar a un excedente de

agua. Es muy común en suelos con marcados contrastes texturales entre sus horizontes, por ejemplo aquellos que presentan un horizonte Bt (Alfisolos, Ultisolos).

- Modelo de infiltración de Horton: explica la formación de excedente de agua por el hecho de que la velocidad de aporte de la lluvia supera la velocidad de infiltración. Se destacan los suelos compactados por maquinaria, por sellado y formación de costra superficial, expansión de las arcillas al humectarse o por urbanización de un área (Porta *et al.*, 2003).

## **2.5 Efecto de escala en el escurrimiento superficial**

En estudios de escurrimientos superficiales y erosión, los datos colectados y el conocimiento de estos procesos han sido originados en su mayoría de lotes a escala y por otra parte, los modelos hidrológicos han sido utilizados a nivel de cuencas (Sivapalan y Kalma, 1995; Kirby, 2001).

Wood *et al.* (1986), Milly y Eagleson (1987), Julien y Moglen (1990) coinciden que el efecto de escala ha sido asociado muy a menudo con la variabilidad espacial de las propiedades físicas del suelo; dentro de los cuales, la capacidad de infiltración es uno de estos importantes factores, aunque la proporción de lluvia que llega a producir escurrimiento depende también de otros elementos.

Se han realizado muchos estudios relacionados a este tema, entre los que destacan los desarrollados por Joel *et al.* (2002), quienes observaron un decremento en el coeficiente de escurrimiento cuando se incrementó la superficie del lote (de 0.25 m<sup>2</sup> a 50 m<sup>2</sup>), incluso durante periodos de continuo escurrimiento. Para ocho eventos de precipitación medidos, la cantidad de escurrimiento producido en los lotes de mayor tamaño fue 60% menor al obtenido en los lotes pequeños; alcanzando coeficientes de escurrimiento de 0.17 y 0.43 para lotes de 50 m<sup>2</sup> y 0.25 m<sup>2</sup>, respectivamente. Estos autores concluyeron que el efecto de escala fue el resultado de varios factores interrelacionados tales como: la conductividad hidráulica del suelo, depresiones de la superficie, contenido inicial de agua en el suelo, longitud de la pendiente y encostramiento.

Castro *et al.* (1999) extendieron sus estudios en cuencas de tres tamaños (14, 110 y 2000 ha), y demostraron que los volúmenes de escurrimiento por unidad de área, y por consiguiente los coeficientes de escurrimiento, incrementaron cuando se aumentó el tamaño de la cuenca y en todos estos casos, los valores fueron más altos que los obtenidos en lotes de 77 m<sup>2</sup>; lo que difiere con lo reportado por Joel *et al.* (2002). Sin embargo, estos autores asumen como posible causa al incremento del flujo subsuperficial producto del agua infiltrada, reapareciendo como flujo superficial en las partes más bajas de la cuenca.

Flores (2004) analizó el efecto de escala en los escurrimientos en Tepatitlán, Jalisco, México, utilizando para ello lotes de escurrimiento de 50 m<sup>2</sup> y microcuencas de 6000 m<sup>2</sup> sembrados con maíz. El coeficiente de escurrimiento que reporta este autor fue de 0.16 en el lote de escurrimiento y 0.04 en la microcuenca.

Cerdan *et al.* (2004) realizaron estudios para comparar escurrimientos superficiales en tres escalas diferentes en Normandía, Francia. Utilizaron dos lotes con medidas de 440 y 480 m<sup>2</sup>, una cuenca de 90 ha y otra de 1100 ha. El coeficiente de escurrimiento medio de la cuenca de 1100 ha (C = 0.006) fue diez veces menor que el de la cuenca de 90 ha y 25 veces menor que los presentados en los lotes de escurrimiento (Cuadro 1).

**Cuadro 1. Características de la lluvia y eventos de escurrimiento medidos en tres sitios de monitoreo en Normandía, Francia.**

	Lotes (450 m <sup>2</sup> )			Cuenca de 90 ha			Cuenca 1100 ha
	Eventos P-Q <sup>x</sup>	Sin pasto	Con pasto	Eventos P-Q	Sin pasto	Con pasto	
Número eventos	142	87	55	112	90	22	91
P media (mm)	4.80	4.50	5.50	12.40	11.30	16.90	13.30
P total (mm)	687.20	387.40	299.80	1393.20	1021.30	371.90	1214.00
Media Q <sub>max</sub> <sup>y</sup> (L s <sup>-1</sup> )	0.60	0.70	0.40	61.80	56.40	83.80	68.10
Volumen medio Q (m <sup>3</sup> )	0.30	0.40	0.20	674.80	698.80	576.30	885.90
Total Q (m <sup>3</sup> )	46.60	37.00	9.50	75 572.70	62 893.50	12 679.20	80 615.00
Media C <sup>z</sup>	0.15	0.21	0.07	0.06	0.07	0.04	0.006
Desv. estándar (C)	19.70	23.10	7.10	4.50	4.60	3.80	1.00

<sup>x</sup> = Precipitación (P) y escurrimiento (Q), <sup>y</sup> = escurrimiento máximo, <sup>z</sup> = coeficiente de escurrimiento

En relación al efecto asociado con el tamaño de los lotes, se aprecia que el valor del coeficiente de escurrimiento tiende a disminuir de 0.15 a 0.006 a medida que la superficie del área de escurrimiento varia de 450 m<sup>2</sup> a 1100 ha, lo que indica que si bien es cierto el volumen de agua escurrido aumenta con la superficie de drenaje, es mayor la proporción de agua que se infiltra y pasa a formar parte del agua en el suelo y de los acuíferos. Con relación a la variación del coeficiente de escurrimiento con pastos, se muestra que el valor del coeficiente es mayor sin pasto y que este tiende a disminuir a medida que aumenta el tamaño del área de captación.

Van de Giesen *et al.* (2000) sugieren que una de las razones para que ocurran estas diferencias de escala se debe al tiempo que le toma al agua moverse desde la parte superior hasta la inferior de la pendiente, ya que una larga pendiente puede brindar más tiempo para que el agua se infiltre.

Hussein (1996) encontró que lotes de 10 m de largo produjeron escurrimientos más altos comparados con lotes de 30 m, indicando el escurrimiento en los lotes de mayor tamaño mediante la siguiente ecuación:

$$V_u = \left(1 - \frac{f_c}{t_c}\right) V_r + f_c \left(\frac{a}{t_c} - T_c\right) - a - Z \quad (2)$$

Donde:

$V_u$  = Escurrimiento (mm)

$f_c$  = Infiltración básica del suelo (mm h<sup>-1</sup>)

$t_c$  = Intensidad de la tormenta (mm h<sup>-1</sup>)

$V_r$  = Precipitación (mm)

$a$  = Cantidad de lluvia necesaria para saturar la capa superficial al inicio de la lluvia (mm)

$T_c$  = Tiempo de concentración para los lotes (h)

$Z$  = Total agua almacenada (mm)

## 2.6 Estimación de escurrimientos

Cuantificar el escurrimiento superficial y la pérdida de suelo a nivel de sitio o cuenca implica un alto costo económico, requiere infraestructura y demanda recursos humanos. Una estrategia viable para disminuir costos y ahorrar tiempo es predecir el escurrimiento mediante funciones empíricas y modelos, ya que estos, no requieren infraestructura para medir componentes hidrológicos, bajan la inversión económica, reducen los recursos humanos, optimizan técnicas de producción agrícola y contribuyen al desarrollo sostenible (Francisco, 2005). Entre las funciones empíricas se encuentran la fórmula racional o de Ramser, fórmula de Frevert, fórmula de Charnier, fórmula de Cook, etc. (Porta *et al.*, 2003). Estas funciones empíricas están basadas en parámetros que deben ser determinados en condiciones experimentales donde se evalúen las entradas y salidas del sistema en estudio. Los diversos métodos disponibles para la estimación de escurrimientos en cuencas pequeñas asumen que el periodo de retorno de un evento de escurrimiento es el mismo que el de la precipitación que causó éste (Hann y Schultze, 1986).

Dado que muchas expresiones empíricas para el cálculo del escurrimiento se basan en el coeficiente de escurrimiento, se hace necesario establecer las bases para calcularlo, en donde se distinguen los enfoques para estimar los escurrimientos medios y máximos instantáneos y donde se utilizan los mismos coeficientes y solo se cambia la entrada de agua, como los siguientes:

1. relación entre la lluvia efectiva y escurrimiento total, donde el gasto se determina mediante la siguiente ecuación:

$$Q=CPA \quad (3)$$

Donde:

Q = volumen escurrido (mm)

C = coeficiente de escurrimiento (adimensional)

P = precipitación (mm)

A = área de drenaje (ha)

Si se asume  $A = 1$  ha, entonces:

$$C = \frac{Q}{P} \quad (4)$$

2. relación entre el escurrimiento máximo y la intensidad máxima (Porta *et al.*, 2003):

$$Q_{\max} = \frac{CIA}{360} \quad (5)$$

Donde:

$Q_{\max}$  = escurrimiento máximo ( $m^3 s^{-1}$ )

$C$  = coeficiente de escurrimiento (adimensional)

$I$  = intensidad máxima de lluvia ( $mm h^{-1}$ )

$A$  = superficie (ha)

360 = factor de ajuste de unidades

Al asumir que  $A = 1$  ha, entonces:

$$C = 360 \times \frac{Q_{\max}}{I} \quad (6)$$

Existen tablas que presentan valores de los coeficientes de escurrimiento, cuyas diferencias entre ellas radican en las zonas en que han sido determinados, el tipo y uso del suelo considerado y la pendiente del terreno. Los valores de  $C$  reportados se basan en datos medidos en campo y se han estimado mediante el uso de la ecuación 4. En el Cuadro 2 se presentan los valores de  $C$  utilizados en la ecuación racional para diversos usos de suelo y según el grupo hidrológico del suelo.

**Cuadro 2. Coeficientes de escurrimiento para diferentes usos de suelo y grupo hidrológico del suelo.**

<b>Cubierta y condición hidrológica</b>	<b>Grupo hidrológico del suelo</b>			
	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>
Cultivo en surco (alineado), práctica deficiente	0.55	0.65	0.70	0.75
Cultivo en surco (alineado), práctica adecuada	0.50	0.55	0.65	0.70
Grano pequeño, práctica deficiente	0.35	0.40	0.45	0.50
Grano pequeño, práctica adecuada	0.20	0.22	0.25	0.30
Pradera, rotación buena	0.30	0.35	0.40	0.45
Pastizal permanente, bueno	0.10	0.20	0.25	0.30
Bosque forestal permanente, maduro	0.06	0.13	0.16	0.20
<b>Residencial en zona urbana</b>				
30% del área impermeabilizada	0.30	0.40	0.45	0.50
70% del área impermeabilizada	0.50	0.60	0.70	0.80

(Disponible en línea en [http://pasture.ecn.purdue.edu/~engelb/abe526/Runoff/C\\_table.html](http://pasture.ecn.purdue.edu/~engelb/abe526/Runoff/C_table.html).) (Consultada el 25 de noviembre de 2007)

El Cuadro 3 presenta la variación de los coeficientes de escurrimiento para diferentes usos del suelo (bosque, pastizales y terrenos de cultivos con distintos grados de pendiente y textura del suelo). Estos valores de C se utilizan para obtener los escurrimientos medios anuales para obras de almacenamiento y los escurrimientos máximos instantáneos (para eventos extraordinarios) para el diseño de obras de excedencia (vertedores) con el método racional o racional modificado (CP-SARH, 1991).

**Cuadro 3. Coeficiente de escurrimiento para diferentes usos de suelo, grado de pendiente y textura del suelo.**

Vegetación	Pendiente (%)	Textura del suelo		
		Gruesa	Media	Fina
Bosque	0-5	0.10	0.30	0.40
	6-10	0.25	0.35	0.50
	11-30	0.30	0.50	0.60
Pastizales	0-5	0.10	0.30	0.40
	6-10	0.16	0.36	0.55
	11-30	0.22	0.42	0.60
Terrenos de cultivos	0-5	0.30	0.50	0.60
	6-10	0.40	0.60	0.70
	11-30	0.52	0.72	0.82

**Fuente:** CP-SARH (1991).

Los valores de C reportados por Chow *et al.* (1988) han sido utilizados para estimar los escurrimientos máximos mediante el método racional para el diseño de obras de drenaje de tipo urbano en la ciudad de Austin (Texas, USA) para distintos usos de suelo y para diferentes periodos de retorno (Cuadro 4). Es importante destacar que el coeficiente de escurrimiento se incrementa a medida que aumenta el periodo de retorno y no se considera el tipo de suelo.

**Cuadro 4. Coeficientes de escurrimiento para diferentes tipos de superficie, pendiente y periodos de retorno de precipitación.**

Tipo de superficie	Periodo de retorno (años)						
	2	5	10	25	50	100	500
<b>Campos de cultivo</b>							
Pendiente baja (0-2%)	0.31	0.34	0.36	0.40	0.43	0.47	0.57
Pendiente media (2-7%)	0.35	0.38	0.41	0.44	0.48	0.51	0.60
Pendiente alta (> 7%)	0.39	0.42	0.44	0.48	0.51	0.54	0.61
<b>Pastizales, prados, dehesas</b>							
Pendiente baja (0-2%)	0.25	0.28	0.30	0.34	0.37	0.41	0.53
Pendiente media (2-7%)	0.33	0.36	0.38	0.42	0.45	0.49	0.58
Pendiente alta (> 7%)	0.37	0.40	0.42	0.46	0.49	0.53	0.60
<b>Bosques, montes arbolados</b>							
Pendiente baja (0-2%)	0.22	0.25	0.28	0.31	0.35	0.39	0.48
Pendiente media (2-7%)	0.31	0.34	0.36	0.40	0.43	0.47	0.56
Pendiente alta (> 7%)	0.35	0.39	0.41	0.45	0.48	0.52	0.58

**Fuente:** Chow *et al.* (1988)

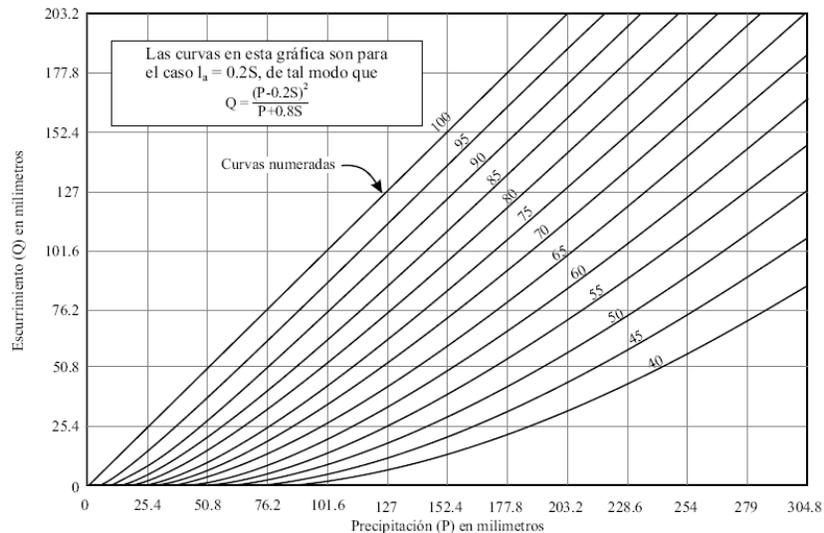
McCuen (2004) ha propuesto valores de C para diferentes usos del suelo, grandes grupos de suelo, diferentes pendientes y periodos de retorno; utilizados por el Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos de Norteamérica (SCS, siglas en inglés) (Anexo 1).

Los valores de los coeficientes de escurrimiento se han adecuado para estimar escurrimientos considerando los diferentes tipos de suelo, similares a los utilizados con el método de curvas numéricas y se toman en cuenta los esquemas de manejo de los cultivos agrícolas lo cual permite evaluar el impacto del manejo del suelo sobre los escurrimientos. Los valores de C se utilizan para evaluar los escurrimientos a nivel anual y no por evento, pero con las adecuaciones necesarias y con la variabilidad de las prácticas de manejo es posible que se puedan utilizar para predecir las relaciones precipitación-escurrimiento por evento.

En años recientes, se ha popularizado el uso de modelos de simulación hidrológica como el SWRRB (Arnold *et al.*, 1990), SWAT (Arnold *et al.*, 1994) y EPIC (Williams, 1991), entre otros. Los anteriores modelos incorporan en el análisis y estimación de procesos hidrológicos la simulación del escurrimiento superficial utilizando el método de curvas numéricas (Simanton *et al.*, 1973; Ponce y Hawkins, 1996).

## 2.7 Método de curvas numéricas (CN)

Fue desarrollado por el SCS, ahora llamado Servicio de Conservación de los Recursos Naturales (NRCS, siglas en inglés), en la década de 1950 (Woodward *et al.*, 1999). Es un modelo hidrológico empírico, probablemente uno de los más populares, que se utiliza para encontrar la relación entre el escurrimiento superficial y los volúmenes de precipitación para un evento de lluvia dado (Figura 2). Se ha usado en un amplio rango de cuencas poco o no instrumentadas que van desde 0.25 ha (Smith y Williams, 1980) a 1000 km<sup>2</sup> (Williams y LaSeur, 1976).



**Figura 2. Curvas numéricas (CN) o relación entre escurrimiento-precipitación (NRCS, 1986).**

### 2.7.1 Bases del método de CN

El escurrimiento superficial puede ser estimado en función de la precipitación, propiedades del suelo, uso y manejo del suelo y la condición hidrológica. Los tres últimos factores pueden aproximarse empíricamente a un solo parámetro, el número de curva (USDA, 1986).

Este método presenta las siguientes relaciones para determinar el escurrimiento:

$$Q = \frac{(P-I_a)^2}{(P-I_a)+S} \quad (7)$$

$$I_a = 0.2S \quad (8)$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (9)$$

Donde:

Q = escurrimiento generado por la precipitación (mm)

P = precipitación (mm)

I<sub>a</sub> = abstracción inicial (mm)

S = potencial máximo de retención de humedad (mm)

CN = curva numérica

### 2.7.2 Abstracción inicial (I<sub>a</sub>)

La I<sub>a</sub> se puede definir como la cantidad de agua que es interceptada por la vegetación y almacenada en depresiones superficiales, antes que se inicie el escurrimiento (Hernández, 2005).

Ponce y Hawkins (1996), se basaron en numerosas pruebas de campo y señalaron que I<sub>a</sub> es proporcional a S por un cociente que varía entre 0.095 y 0.38, con un valor medio de 0.2; dicho valor proviene de cuencas agrícolas de 10 ha aproximadamente y con una precipitación de 600 mm o más anuales. De ahí que la aplicación de esta metodología en cuencas puede producir

errores, haciendo inclusive difícil la extrapolación de valores al interior de una misma cuenca (Cosandey, 1999; Descroix *et al.*, 2001). Al sustituir el valor de  $I_a = 0.2S$  en la ecuación 7, la determinación del escurrimiento queda de la siguiente forma:

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad \text{para } P > 0.2S; \text{ si } P < 0.2S, \text{ entonces } Q = 0 \quad (10)$$

Esta abstracción inicial varía según los diversos usos de suelo, Overton y Meadows (1976) estimaron esta abstracción aproximadamente en 2.5 mm para áreas urbanas con 10% de cobertura vegetal; Schomaker (1966) estimó que el 24% de la precipitación anual es interceptada por follaje denso. Asimismo, Wanielista y Shannon (1977) reportaron valores de 1 mm para follaje denso y 3-4 mm para áreas urbanas planas y Viessman (1968) reportó una abstracción inicial de 2 mm para cuatro cuencas urbanizadas.

Sin embargo, estudios más recientes desarrollados por Hawkins *et al.* (2002) revelan gran cantidad de valores del radio de abstracción inicial ( $I_a/S$  ó  $\lambda$ ) más apropiados, pero ninguno tan alto como 0.2. Woodward *et al.* (2003) indican que la justificación inicial para establecer el valor de  $\lambda$  no está clara y la documentación de la misma es oscura, por lo que su valoración debe ser revisada. Por ello analizaron datos de precipitación y escurrimiento de 307 cuencas y lotes, provenientes de USDA-ARS (Agricultural Research Service), US Forest Service, US Geological Survey y New México State University. Utilizaron un total de 28 031 eventos de precipitación disponibles para realizar el análisis, en donde los datos naturales se refiere a los pares de datos de P y Q que ocurren de manera natural en el tiempo; mientras que, en los datos ordenados, se considera aproximadamente el mismo periodo de retorno para P y Q (Cuadro 5). De esto se logró determinar que  $\lambda$  varía desde 0.0005 a 0.4910, con una mediana de 0.05 y donde el 90% de los valores obtenidos fueron menores que 0.2.

**Cuadro 5. Resultados del valor del radio de abstracción inicial ó  $\lambda$ .**

	N Total eventos		Dato natural				Dato ordenado			
			Max	Media	Mediana	Min	Max	Media	Mediana	Min
ARS	134	12 499	0.5766	0.0555	0.0001	0	0.9682	0.1491	0.0736	0
USLE (ARS)	137	11 140	0.996	0.0997	0	0	0.9266	0.1581	0.061	0
Otros	36	4392	0.4727	0.04	0	0	0.9793	0.0992	0.0044	0
Total	307	28 031	0.996	0.0734	0	0	0.9793	0.1472	0.0618	0

**Fuente:** Woodward *et al.* (2003).

El valor de  $\lambda = 0.05$  según lo reportado por Woodward *et al.* (2003) brinda un mejor ajuste de datos y puede ser más apropiado su uso para el cálculo de escurrimientos, quedando la ecuación 10 de la siguiente forma:

$$Q = \frac{(P-0.05S)^2}{P+0.95S} \quad (11)$$

### 2.7.3 Potencial máximo de retención de humedad (S)

Es un índice del sitio, definido por la diferencia máxima entre la lluvia y el escurrimiento directo y tiene valores en el rango de 0 hasta infinito (Hernández, 2005). Según Boughton (1989), el potencial máximo de retención S se incrementa en forma exponencial cuando CN decrece desde 100, como se muestra en el Cuadro 6.

**Cuadro 6. Valor del potencial máximo de retención de humedad (S) para cada valor de curva numérica (CN).**

CN	S (mm)	CN	S (mm)
100	0	60	169.3
95	13.4	55	207.8
90	28.2	50	254.0
85	44.8	45	310.4
80	63.5	40	381.0
75	84.7	35	471.7
70	108.9	30	592.7
65	136.8		

El valor de S se puede determinar de diversas formas, si se conoce el valor de la CN, por medio de la ecuación 9 y si se cuenta con datos de P y Q mediante la siguiente ecuación (Schneider y McCuen, 2005):

$$S = \frac{P}{\lambda} + \frac{Q(1-\lambda)}{2\lambda^2} - \frac{1}{2\lambda^2} [Q^2(1-\lambda)^2 + 4\lambda PQ]^{0.5} \quad (12)$$

El parámetro de retención de humedad varía con el perfil del suelo de acuerdo con la siguiente ecuación (Neitsch *et al.*, 2005):

$$S = S_{\max} \left( 1 - \frac{SW}{[SW + \exp(w_1 - w_2 \cdot SW)]} \right) \quad (13)$$

Donde:

S = parámetro de retención para un contenido de humedad dada (mm)

S<sub>max</sub> = máximo valor del parámetro de retención que se puede alcanzar en cualquier día (mm)

SW = contenido de humedad del suelo en el perfil del suelo, excluyendo la cantidad de agua que se encuentra a PMP (mm H<sub>2</sub>O)

w<sub>1</sub> y w<sub>2</sub> = coeficientes

El valor máximo del parámetro de retención (S<sub>max</sub>) se calcula mediante la ecuación 9 usando CN<sub>1</sub>.

Los coeficientes pueden determinarse resolviendo la ecuación 13 asumiendo que:

- El parámetro de retención para la CHA I corresponde al contenido de humedad del suelo a PMP.
- El parámetro de retención para la CHA III corresponde al contenido de humedad del suelo a CC.
- El suelo tiene un valor de CN de 99 (S = 2.54) cuando se encuentra saturado.

$$w_1 = \ln \left[ \frac{FC}{1 - S_3 \cdot S_{\max}^{-1}} - FC \right] + w_2 \cdot FC \quad (14)$$

$$w_2 = \frac{\left( \ln \left[ \frac{FC}{1 - S_3 \cdot S_{\max}^{-1}} - FC \right] - \ln \left[ \frac{SAT}{1 - 2.54 \cdot S_{\max}^{-1}} - SAT \right] \right)}{(SAT - FC)} \quad (15)$$

Donde:

$w_1$  = coeficiente de la primera capa

$w_2$  = coeficiente de la segunda capa

FC = contenido de humedad del perfil del suelo a capacidad de campo (mm H<sub>2</sub>O)

$S_3$  = parámetro de retención para CHA III

$S_{\max}$  = parámetro de retención para CHA I

SAT = contenido de humedad del suelo cuando se encuentra totalmente saturado (mm H<sub>2</sub>O)

2.54 = valor del parámetro de retención para una CN de 99

Esto indica que el valor de S es dinámico y depende de los contenidos de humedad y de las propiedades hidrológicas de los suelos.

El cálculo diario del valor de CN como función de la evapotranspiración de la planta fue agregado porque el método de humedad del suelo ha estimado escurrimientos muy altos en suelos bajos. Al calcular CN de esta forma, el valor es menos dependiente del almacenamiento de agua del suelo y más dependiente de las condiciones del clima.

La siguiente ecuación se utiliza para actualizar el parámetro de retención al final del día:

$$S = S_{\text{prev}} + E_o * \exp \left( \frac{-\text{cncoef} \cdot S_{\text{prev}}}{S_{\max}} \right) - R_{\text{day}} - Q_{\text{surf}} \quad (16)$$

Donde:

S = parámetro de retención para un día dado (mm)

$S_{prev}$  = parámetro de retención para el día anterior (mm)

$E_o$  = evapotranspiración potencial del día ( $mm\ d^{-1}$ )

cncoef = coeficiente utilizado para calcular el coeficiente de retención diario que depende de la evapotranspiración

$S_{max}$  = máximo valor del parámetro de retención que se puede alcanzar en cualquier día (mm)

$R_{day}$  = lámina de lluvia precipitada en el día ( $mm\ H_2O$ )

$Q_{surf}$  = escurrimiento superficial ( $mm\ H_2O$ )

El valor inicial del parámetro de retención se define como:

$$S = 0.9 \times S_{max} \quad (17)$$

Antes de darse las modificaciones en el radio de abstracción inicial, los valores de curvas numéricas fueron determinadas utilizando el valor tradicional de  $\lambda = 0.20$ , por lo que se tuvo que encontrar la relación entre los valores de  $S_{0.05}$  y  $S_{0.20}$ , que para los datos naturales y ordenados obtenidos por Woodward *et al.* (2003) fueron las siguientes, respectivamente:

$$S_{0.05} = 1.344S_{0.20}^{1.149} \quad r^2 = 99.38\% \quad (18)$$

$$S_{0.05} = 1.316S_{0.20}^{1.164} \quad r^2 = 99.44\% \quad (19)$$

Donde  $S_{0.05}$  y  $S_{0.20}$  están dados en pulgadas. De los valores muy similares de las ecuaciones 18 y 19 se condensa una sola (ecuación 20):

$$S_{0.05} = 1.33S_{0.20}^{1.15} \quad (20)$$

## 2.8 Alternativas para la estimación de CN

Si se cuenta con los datos de P y Q, Hawkins *et al.* (2002) propusieron dos métodos para estimar los valores de CN:

1. Precipitación-escurrimiento
2. Pares ordenados

Una tercer alternativa que puede utilizarse, se basa en un análisis de frecuencia log-normal (Schneider y McCuen, 2005).

### 2.8.1 Precipitación-escurrimiento

Para utilizar este método, es necesario medir los datos de P y Q por evento. Para cada precipitación, las láminas de P y Q son usadas en la ecuación 12 para determinar S, luego se obtiene el valor de CN por medio de la siguiente ecuación:

$$CN = \frac{25\ 400}{(S+254)} \quad (21)$$

El mejor estimador de CN para cuencas según lo reportado por Schneider y McCuen (2005) es la media o mediana de este método.

### 2.8.2 Método pares ordenados

Hawkins (1993) expresa que los datos de P y Q registrados se ordenan de mayor a menor, esto quiere decir que al mayor evento de precipitación corresponderá ahora el mayor valor de lámina escurrida y así sucesivamente. Cuando los valores de CN son calculados y graficados en el eje de las ordenadas y la lámina precipitada en el eje de las abscisas, pueden ocurrir tres comportamientos distintos como se muestra en la Figura 3 (Lamont, 2006).

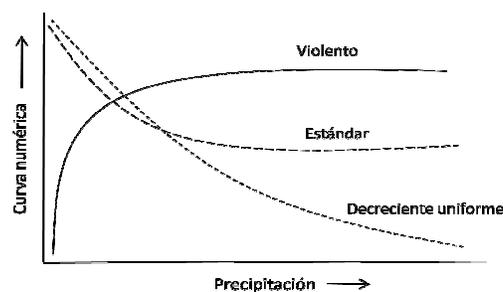


Figura 3. Comportamiento de CN según cantidad de lluvia.

El comportamiento estándar es el escenario más común, en donde los valores de CN decrecen cuando se incrementa la precipitación, aproximándose a un valor constante (Hawkins, 1993). Este autor consideró la hipótesis que la generación de escurrimiento puede incluir una variedad de procesos como flujo superficial y subsuperficial (Lamont, 2006). Este método es recomendado por Hawkins *et al.* (2002) porque en trabajos de diseño, la frecuencia del escurrimiento se asume generalmente como frecuencia de la lluvia (Schneider y McCuen, 2005).

La ecuación que se ajusta a este comportamiento estándar es la siguiente (Hawkins, 1993):

$$CN(P) = CN_{\infty} + (100 - CN_{\infty}) \times \exp(-k_1 P) \quad (22)$$

Donde:

$CN_{\infty}$  = valor constante al que tiende CN cuando la precipitación tiende a infinito

$-k_1$  = constante ajustada

P = precipitación (mm)

El comportamiento violento puede indicar datos extremos para algunas láminas críticas de lluvia, pero igual tiende a un valor constante; en cambio, el comportamiento decreciente uniforme no puede ser estimado ya que no se aproxima a un valor constante como los anteriores (Lamont, 2006). Hawkins (1993) reportó que el comportamiento violento es acompañado a menudo por el comportamiento decreciente uniforme con precipitaciones bajas. En este caso, se encontró la ecuación 23 para representar la relación CN-P ignorando el comportamiento decreciente uniforme:

$$CN(P) = CN_{\infty} [1 - \exp(-k_2 P)] \quad (23)$$

Donde:

$CN_{\infty}$  = valor constante al que tiende CN cuando la precipitación tiende a infinito

$-k_2$  = constante ajustada

P = precipitación (mm)

## **2.9 Factores necesarios para estimar CN**

### **2.9.1 Grupo hidrológico del suelo**

En años recientes ha habido un incremento en los datos de las propiedades básicas de los suelos desde que Musgrave (1955) propuso inicialmente el concepto de grupos hidrológicos de suelo. Los grupos hidrológicos de suelos son A, B, C y D y grupos duales como A/D, B/D, B/C.

Los suelos del grupo hidrológico A tienen un bajo potencial de escurrimiento, los suelos de grupo B poseen una infiltración moderada; mientras que, los del tipo C tienen una baja infiltración; en cambio los agrupados en D presentan un alto potencial de escurrimiento. Los suelos que presentan dos letras se refiere a aquellos que en condiciones húmedas pueden ser drenados en forma adecuada (Hjelmfelt *et al.*, 2001).

### **2.9.2 Condición hidrológica o cobertura vegetal del terreno**

Como su nombre lo indica, se refiere a la cubierta vegetal del suelo, que incide en forma directa en la protección del suelo del impacto directo de las gotas de lluvia.

Esta condición se agrupa en:

Buena > 75% cobertura

Regular entre 50 y 75%

Mala < 50%

### **2.9.3 Uso de suelo**

Aquí se consideran las diferentes prácticas de manejo y uso a que es sometido el suelo. Dentro de los usos de suelo se pueden mencionar: suelo en descanso, cultivos de escarda, cultivos tupidos, pastizales, bosque, caminos pavimentados, etc. Las prácticas implementadas pueden ser surcos rectos, curvas a nivel, terrazas, sin tratamiento mecánico, entre otras.

### 2.9.4 Condición de humedad antecedente (CHA)

Se refiere a la lámina de precipitación acumulada en los cinco días previos a la lluvia en estudio. Basado en la condición de los cinco días previos, Boughton (1989) estableció valores según el periodo de crecimiento o no de la vegetación de la cuenca, como se muestra en el Cuadro 7.

**Cuadro 7. Selección de CN<sub>1</sub>, CN<sub>2</sub> o CN<sub>3</sub> en base a la precipitación acumulada cinco días previos al evento de estudio.**

CN	Precipitación cinco días previos (mm)	
	No crecimiento <sup>x</sup>	Crecimiento
CN <sub>1</sub> <sup>y</sup>	< 12.6	< 35.6
CN <sub>2</sub>	12.6 -28	35.6 -53.3
CN <sub>3</sub>	> 28	> 53.3

<sup>x</sup> = se refiere al periodo de no crecimiento o crecimiento de la vegetación en una cuenca, y = valor de curva numérica para condición de humedad antecedente seca (CN<sub>1</sub>), media (CN<sub>2</sub>) y húmeda (CN<sub>3</sub>).

Francisco (2005) utilizó el criterio de crecimiento de cultivo en la región de Vistahermosa, Veracruz. Sin embargo, Mitchell *et al.* (1993) calibraron y validaron el modelo AGNPS (Agricultural NonPoint Source Pollution Model, por sus siglas en inglés) para dos cuencas pequeñas de 18 y 30 ha en Piatt County, IL., con pendientes promedios inferiores a 2%, revelando la calibración que la modificación de la precipitación en los cinco días previos fue necesaria para ajustar los valores estimados con los observados, obteniendo valores < 12 mm, 12-41mm y > 41 mm para las CHA seca, media y húmeda, respectivamente.

La ecuación 21 está dada para estimar los valores de CN con una CHA II, por lo que diversos autores, entre los que se puede mencionar a Sobhani (1976), reportó las ecuaciones algebraicas 24 y 25 para calcular CN<sub>1</sub> y CN<sub>3</sub> a partir de CN<sub>2</sub> y que Hawkins (1978) estimó que estas relaciones tienen una precisión cercana de  $\pm 1$  CN.

$$CN_1 = \frac{CN_2}{2.334 - 0.01334 CN_2} \quad (24)$$

$$CN_3 = \frac{CN_2}{0.4036 + 0.0059 CN_2} \quad (25)$$

## 2.10 Factores que inciden en la determinación de CN

Estudios de simulación demuestran que dentro de los factores que afectan la precisión en la estimación de CN se encuentran el tamaño de la muestra, las abstracciones iniciales y el rango de los datos (Schneider y McCuen, 2005).

### 2.10.1 Tamaño de la muestra

La teoría estadística indica que la precisión incrementa con el tamaño de la muestra, pero aún no se tiene claro cuál debe ser el tamaño mínimo necesario para obtener una precisión estimada de CN. Para el caso se tiene que Hawkins *et al.* (2002) solamente utilizaron pares de datos con al menos 20 observaciones; sin embargo, se tiene la expectativa que a mayor cantidad de datos se tendrá una variación muy pequeña del error y no serán influenciados en gran medida por datos extremos (Schneider y McCuen, 2005).

### 2.10.2 Efecto del radio de abstracción inicial ( $\lambda$ )

Resultados indican que valores de  $\lambda$  cercanos o iguales a 0.05 dan un mejor ajuste de datos y puede ser más apropiado su uso para la estimación de escurrimientos superficiales (Woodward *et al.*, 2003).

McCuen (2003) realizó un análisis de sensibilidad, en donde Q fue el parámetro evaluado. Para una lámina precipitada de 75 mm, CN igual a 90 y  $I_a/S$  ó  $\lambda = 0.05$ , se obtuvo una sensibilidad relativa de CN y  $\lambda$  de 3.03 y -0.02, respectivamente. Esto significa que un incremento de 1% en CN produce un aumento de 3.03% en Q; mientras que, al incrementar  $\lambda$  en

1%, resulta un decremento de Q en 0.02%. De ahí la importancia de determinar lo más acertadamente los valores de CN.

### **2.10.3 Método de estimación y rango de datos**

El método de P-Q es más preciso y presenta menos desviación que el método de pares ordenados, lo que se ha comprobado con resultados procedentes de simulaciones. Si una nueva tabla con valores más precisos de CN pretende desarrollarse, se requerirá una base de datos muy grande con valores de precipitación y escurrimiento (Schneider y McCuen, 2005).

### **2.11 Limitaciones del método de CN**

A pesar de ser un método ampliamente popular, ha sido criticado por ser una metodología simple para simular un sistema hidrológico sofisticado. Sin embargo, es muy usado en Estados Unidos y otros países por las ventajas que presenta frente a otros debido a su simplicidad, predicción y estabilidad (Ponce y Hawkins, 1996). Dentro de las limitaciones de este método podemos mencionar las siguientes:

- La clasificación de los grupos hidrológicos de los suelos no son consistentes de acuerdo con el NRCS.
- El escurrimiento superficial calculado es más sensible al número de curva que a la precipitación (McCutcheon, 2006).
- Funciona muy bien para cuencas agrícolas pero no es buen estimador para cuencas forestales (Hawkins, 1984).

### **2.12 Estudios realizados sobre la relación precipitación-escurrimiento a través del método de CN en México**

En el Cuadro 8 se presentan algunos resultados obtenidos en México por diversos autores en distintas regiones de la República Mexicana. Medard (1994) encontró valores de CN entre 82

y 84, además de obtener coeficientes de escurrimiento medio por evento entre 0.003 y 0.43. Según este autor, el método carece de flexibilidad en la estimación de la condición de humedad antecedente y establece que la misma debería ser función de la capacidad de retención del suelo y de las condiciones climáticas (temperatura, viento, evapotranspiración y el tiempo que separa la lluvia en estudio de la lluvia inmediatamente anterior). Asimismo expresa que las CN se prestan poco para la estimación de los escurrimientos superficiales generados a nivel de microcuencas experimentales o en condiciones de pequeñas parcelas agrícolas de superficie igual o inferior a 0.6 ha.

Tapia-Vargas *et al.* (2000) estimaron valores de CN de 93 para cultivo tradicional de maíz en Andosoles de la cuenca del Lago de Pátzcuaro, siendo ligeramente mayor a los obtenidos en la investigación realizada por Medina (2006), quien encontró valores globales de CN comprendidos entre 85 y 88 para las tres CHA en suelos tipo Acrisol

Flores (2004) reportó CN con CHA media y húmeda para maíz de 84 y 85, respectivamente, en lotes de escurrimiento con área de 50 m<sup>2</sup>; mientras que, en microcuencas de 6000 m<sup>2</sup> los valores de estas curvas se redujeron de 79 a 74, y para un área de 22 ha fue mayor la disminución de las curvas numéricas (77 y 68, respectivamente)

Francisco (2005) encontró una alta variabilidad en los valores de CN para tratamientos de terrazas de muro vivo con tracción animal, labranza de conservación y labranza tradicional, de ahí que los valores promedios presentaron baja eficiencia en la predicción de escurrimiento superficial, tendiendo a sobreestimarlos. Debido a esto determinó valores de CN que aportaron la máxima eficiencia en la predicción de escurrimiento, tomando valores del intervalo de variación.

**Cuadro 8. Valores de CN obtenidos en diferentes sistemas de labranza y uso de suelo en México.**

<b>Autor</b>	<b>Lugar de la investigación</b>	<b>Tratamiento</b>	<b>Área de la parcela (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Valor CN (ciclo del cultivo)</b>
Medard (1994)	Lomas de San Juan, Chapingo, Edo. México	Frijol <sup>s</sup>	6000	81
Flores (2004)	Tepatitlán, Jalisco	Maíz	50	84 y 85*
		Maíz	6000	79 y 74*
		Agave tequilero	50	88
		Pasto nativo	50	81 y 79*
Francisco (2005)	Vistahermosa, Veracruz	Terrazas de muro vivo con tracción animal <sup>t</sup>	50	71
		Labranza de conservación <sup>u</sup>	50	71
		Labranza tradicional <sup>v</sup>	50	85
Medina (2006) <sup>r</sup>	Etecuaro, Morelia, Mich.	Año y Vez (descanso+pastoreo, avena, descanso) <sup>w</sup>	1067.4	87
		Manejo mejorado (haba+veza, avena, maíz+frijol) <sup>x</sup>	904	87
		Manejo orgánico (haba, avena, maíz+frijol) <sup>y</sup>	1002.4	86
		Manejo tradicional (haba, avena, maíz+frijol) <sup>z</sup>	992.3	88

<sup>r</sup> = Los tratamientos fueron tomados durante un periodo de tres años, los que se encuentran entre paréntesis, <sup>s</sup> = sembrado a chorrillo, <sup>t</sup> = densidad de población a la cosecha fue de 43 126 plantas, <sup>u</sup> = se dejó en campo la totalidad de rastrojo producido en dos ciclos de cultivo de maíz, aproximadamente 4.10 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, no se roturó y control de malezas con herbicidas, <sup>v</sup> = Quema de residuos de cosecha de maíz al final del ciclo y roturación del suelo con arado de tracción mecánica, <sup>w</sup> = Preparación del suelo con un barbecho de tractor, una rastra de discos, surcado con tiro de animal y siembra manual, dos escardas cuando fue requerido, <sup>x</sup> = Preparación de suelo similar al tratamiento de año y vez, se incorporó 30% de residuos de cosecha, <sup>y</sup> = Laboreo de suelo tradicional (descrito en año y vez), utilización de estiércoles y compostas como fuentes de fertilización, <sup>z</sup> = Laboreo de suelo similar al de año y vez, \* = valores que corresponden para CHA media y húmeda, respectivamente.

### 2.13 Modelos de simulación hidrológica

A partir de la década de 1960, se inicio el uso de modelos hidrológicos de primera generación donde destaca el Stanford 4 diseñado en la Universidad de Purdue. Este modelo se desarrolló como un modelo hidráulico para describir los diferentes procesos hidrológicos dentro

de una cuenca y se basa en la solución de las ecuaciones de continuidad y de movimiento del flujo para estimar el flujo superficial.

Estos modelos se continuaron desarrollando, pero presentaban el problema que requerían información pluviográfica, hidrométrica y paramétrica para alimentarlos y resolver las ecuaciones de flujo del agua superficial; pero a pesar de esto se siguen utilizando y presentan buena precisión cuando se cuenta con información confiable especialmente en cuencas instrumentadas. En la década de 1980 se empezaron a diseñar modelos de simulación hidrológica que se basan en el uso del método de predicción de escurrimiento del NRCS, que es un modelo paramétrico que se aplica generalmente en cuencas no instrumentadas.

El modelo SWRRB fue desarrollado y probado por el ARS, cuya aplicación principal es la de predecir el efecto del manejo del suelo y la vegetación sobre la producción de agua y sedimentos en cuencas rurales no instrumentadas (Williams *et al.*, 1985). Los componentes básicos del modelo son: clima, hidrología y producción de sedimentos y dentro de los principales procesos que incluye el modelo se tiene el escurrimiento superficial, percolación, escurrimiento subsuperficial, evapotranspiración, pérdidas por filtración en cauces, balance de agua en almacenamientos entre otros (Maldonado, 1998).

El componente hidrológico de este modelo se basa en la siguiente ecuación de balance hídrico:

$$SW_t = SW + \sum_{i=1}^t (R_i - Q_i - ET_i - P_i - QR_i) \quad (26)$$

Donde:

$SW_t$  = Contenido de agua en el suelo el día t (mm)

$SW$  = Contenido de agua en el suelo del día anterior (mm)

$R_i$  = Precipitación del día i (mm)

$Q_i$  = Escurrimiento superficial del día i (mm)

$ET_i$  = Evapotranspiración del día i (mm)

$P_i$  = Percolación del día i (mm)

$QR_i$  = Escurrimiento subsuperficial lateral para todo el perfil en el día i (mm)

t = Tiempo (días)

La estimación del escurrimiento superficial a nivel de evento se basa en el uso del modelo del NRCS y depende básicamente de la variación de las curvas numéricas por efecto de los diferentes usos del suelo y de las prácticas de manejo establecidas, lo que permite simular los procesos de cambios en los escurrimientos en las cuencas bajo manejo (Arnold y Williams, 1994).

El modelo EPIC fue diseñado por el ARS para la toma de decisiones sobre el uso de sistemas alternativos de cultivo y su efecto en los aspectos socioeconómicos y la sostenibilidad ambiental (Williams, 1990). Entre sus usos se incluye la evaluación de la productividad de los cultivos y los riesgos de su producción, la degradación del recurso suelo, los impactos de la calidad del agua, la respuesta a diferentes niveles de insumos y prácticas de manejo y la respuesta a la variación espacial en clima y suelo (López, 2006). El modelo incorpora numerosos componentes, definidos como procesos biofísicos mayores y entre los cuales se tienen la hidrología, clima, erosión, ciclo de nutrientes, crecimiento de plantas, temperatura del suelo y componente económico (Sharpley y Williams, 1990). Desde el punto de vista hidrológico utiliza el mismo modelo del NRCS y su aplicación depende de la buena selección de las curvas numéricas para antes y después de las acciones de manejo de las cuencas.

El SWAT es un modelo hidrológico de segunda generación del SWRRB que fue desarrollado para el ARS a principios de los años 90, con el fin de predecir el impacto ocasionado en el agua por las prácticas de manejo del suelo, sedimentos y producción de químicos utilizados en la agricultura en cuencas grandes y complejas con variaciones del suelo, uso y manejo del suelo sobre largos periodos de tiempo. Este modelo se basa en la ecuación general de balance hídrico (Ecuación 26) y requiere información específica del clima, propiedades del suelo, topografía, vegetación y prácticas de manejo de suelo. Los procesos físicos asociados con el movimiento de agua, movimiento de sedimentos, crecimiento del cultivo, etc., son modelados directamente por SWAT (Neitsch *et al.*, 2005). Las adecuaciones realizadas a este modelo de simulación fue modificar la forma de estimar el potencial de

retención en forma dinámica a partir de las condiciones de humedad de los suelos o la capacidad evapotranspirativa de la vegetación para adecuar el valor de CN.

### 2.13.1 Calibración y validación de modelos

La calibración de un modelo consiste en lograr un ajuste satisfactorio entre los datos observados y los datos estimados, mediante el cambio en los valores de los parámetros de mayor influencia, aún de aquellos considerados conocidos; mientras que, la validación es una medición de la capacidad predictiva del modelo mediante la comparación de los valores calculados y observados, siempre y cuando estos últimos no hayan sido tomados en cuenta en el proceso de calibración, puesto que de otra forma sólo se estaría midiendo la bondad de dicha calibración y no el poder predictivo del modelo (Palacios, 1986).

Un modelo es “bueno” mientras los valores estimados se acerquen más a la línea de tendencia 1:1 y los puntos de observación se distribuyan uniformemente sobre la misma línea 1:1; dicho de otra manera, se considera que se ha desarrollado un buen modelo cuando los valores obtenidos con el modelo de predicción presentan un comportamiento similar a los valores que se han obtenido en el campo y que representan las condiciones reales (IBSNAT, 1985).

Existen diversas metodologías para medir la bondad de ajuste entre los datos observados y estimados, dentro de los cuales se tiene el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), que presenta un rango de variación que va desde cero (que indica un mal ajuste del modelo) hasta uno (buen ajuste o modelo perfecto) y se calcula a través de la siguiente expresión (Legates y McCabe, 1999):

$$R^2 = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^N (V_o - \bar{V}_o)(V_s - \bar{V}_s)}{\left[ \sum_{i=1}^N (V_o - \bar{V}_o)^2 \right]^{0.5} \left[ \sum_{i=1}^N (V_s - \bar{V}_s)^2 \right]^{0.5}} \right\} \quad (27)$$

Donde:

$R^2$  = coeficiente de determinación

$V_o$  = valor observado  
 $\bar{V}_o$  = valor medio observado  
 $V_s$  = valor estimado  
 $\bar{V}_s$  = valor medio estimado

Otra forma de calcular la bondad de ajuste de datos observados y calculados es el uso del coeficiente de determinación utilizado por Francisco (2005), el cual se expresa de la siguiente forma:

$$R^2 = 1 - \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (V_o - V_s)^2}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (V_o - \bar{V}_s)^2} \quad (28)$$

Donde las variables fueron definidas previamente.

## 2.14 Conclusión de la revisión de literatura

De la revisión de literatura se puede concluir que existe una alta variabilidad en cuanto a los valores de coeficientes de escurrimiento obtenidos para distintas condiciones de manejo del suelo. La determinación de escurrimientos superficiales y erosión generalmente han sido estudiados a nivel de parcelas o lotes de escurrimiento y se ha observado que a medida que se incrementa la superficie de captación, el coeficiente de escurrimiento tiende a disminuir, lo que limita obtener datos puntuales de C para distintas condiciones. Por lo que se puede establecer que los coeficientes tabulados son muy propios de las regiones en donde han sido determinados, resultando de gran importancia obtener valores de este coeficiente para cada región y condición del suelo.

En cuanto al método de curvas numéricas, este resulta de mucha importancia para la estimación de escurrimientos superficiales en cuencas poco o no instrumentadas. Si bien es cierto que se ha venido utilizando durante décadas y es incorporado por algunos modelos hidrológicos para estimar escurrimientos superficiales, se ha criticado mucho ya que se argumenta que es un modelo muy simple para simular un sistema hidrológico sofisticado, pero su simplicidad, predicción y estabilidad hacen que se mantenga vigente a través del tiempo, con ligeras

variaciones, de las que se destaca el radio de abstracción inicial, que en un inicio se estableció en un valor de 0.2 pero con bases de datos de escurrimientos de cuencas y lotes de escurrimiento se logró establecer un nuevo valor de 0.05, que presenta un mejor ajuste en la estimación de los escurrimientos.

Al igual que el coeficiente de escurrimiento, los valores de CN presentan una gran variabilidad y se han obtenido generalmente en regiones de los Estados Unidos de Norteamérica, por lo que se hace necesario obtener valores propios para la República Mexicana para distintos sistemas de manejo del suelo, de ahí la importancia de la realización del presente trabajo, para conocer la variabilidad temporal del coeficiente de escurrimiento y curvas numéricas.

### **III. OBJETIVOS, HIPÓTESIS Y SUPUESTOS**

#### **3.1 Objetivo general**

Evaluar la relación precipitación – escurrimiento para diferentes sistemas de manejo del suelo en dos regiones de México.

#### **3.2 Objetivos específicos**

1. Identificar los cambios en las propiedades hidrológicas de los suelos afectados por los sistemas de manejo.
2. Analizar la variación temporal de la relación precipitación-escurrimiento con cambios en cobertura vegetal y sistemas de manejo del suelo.
3. Determinar el comportamiento multitemporal del coeficiente de escurrimiento y curvas numéricas para diferentes sistemas de manejo del suelo.

#### **3.3 Hipótesis**

1. Los cambios en las condiciones de humedad del suelo, el uso de residuos de cosecha y la cobertura del follaje del cultivo explican de forma satisfactoria la variabilidad multitemporal del coeficiente de escurrimiento y curvas numéricas.

#### **3.4 Supuestos**

- La base de datos de eventos de precipitación y escurrimiento de los lotes de escurrimiento son confiables.
- La ecuación de balance hídrico permite generar datos confiables de contenidos de humedad en el suelo.

## IV. MATERIALES Y MÉTODOS

### 4.1 Descripción de áreas de estudio

El trabajo de tesis se desarrolló con la base de datos de precipitación y escurrimiento generada en dos regiones de la República Mexicana durante el periodo de 1996-2001: la localidad de Ajuno, municipio de Pátzcuaro, Michoacán y la localidad de Vistahermosa, municipio de San Andrés Tuxtla, Veracruz. Para fines prácticos se denominarán Sitio 1 y Sitio 2, respectivamente (Figura 4).

El Sitio 1 se encuentra en la estación experimental del Centro Nacional de Producción Sostenible (CENAPROS); dependiente del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias (INIFAP). Se ubica en las coordenadas 19°29'06" latitud norte y 101°44'22" longitud oeste y una altitud de 2240 m. El área experimental se localiza en la cuenca del lago de Pátzcuaro, que es del tipo endorreica con 956.2 km<sup>2</sup> donde los escurrimientos superficiales descargan al Lago de Pátzcuaro, que ocupa una superficie de 9.3% del área total de la cuenca (Tiscareño *et al.*, 1999).

El Sitio 2 se ubica en el ejido Vistahermosa, municipio de San Andrés Tuxtla, Veracruz, con coordenadas geográficas de 18°20'45" latitud norte y 95°18'40" longitud oeste y una altitud de 59 m (Uribe-Gómez *et al.*, 2000; Francisco, 2005). Desde 1948, estos terrenos se incorporaron con cultivos como arroz, caña de azúcar y maíz, pero fue hasta 1988 que investigadores del INIFAP instalaron un experimento de carácter permanente donde se practicó, en forma ininterrumpida, un cultivo doble de maíz en terrazas de muro vivo.

#### 4.1.1 Suelos

Los suelos del sitio 1 en estudio pertenecen al grupo de los Andosoles formados a partir de materiales piroclásticos compuestos de cenizas y vidrio volcánico (Chapa, 1987).

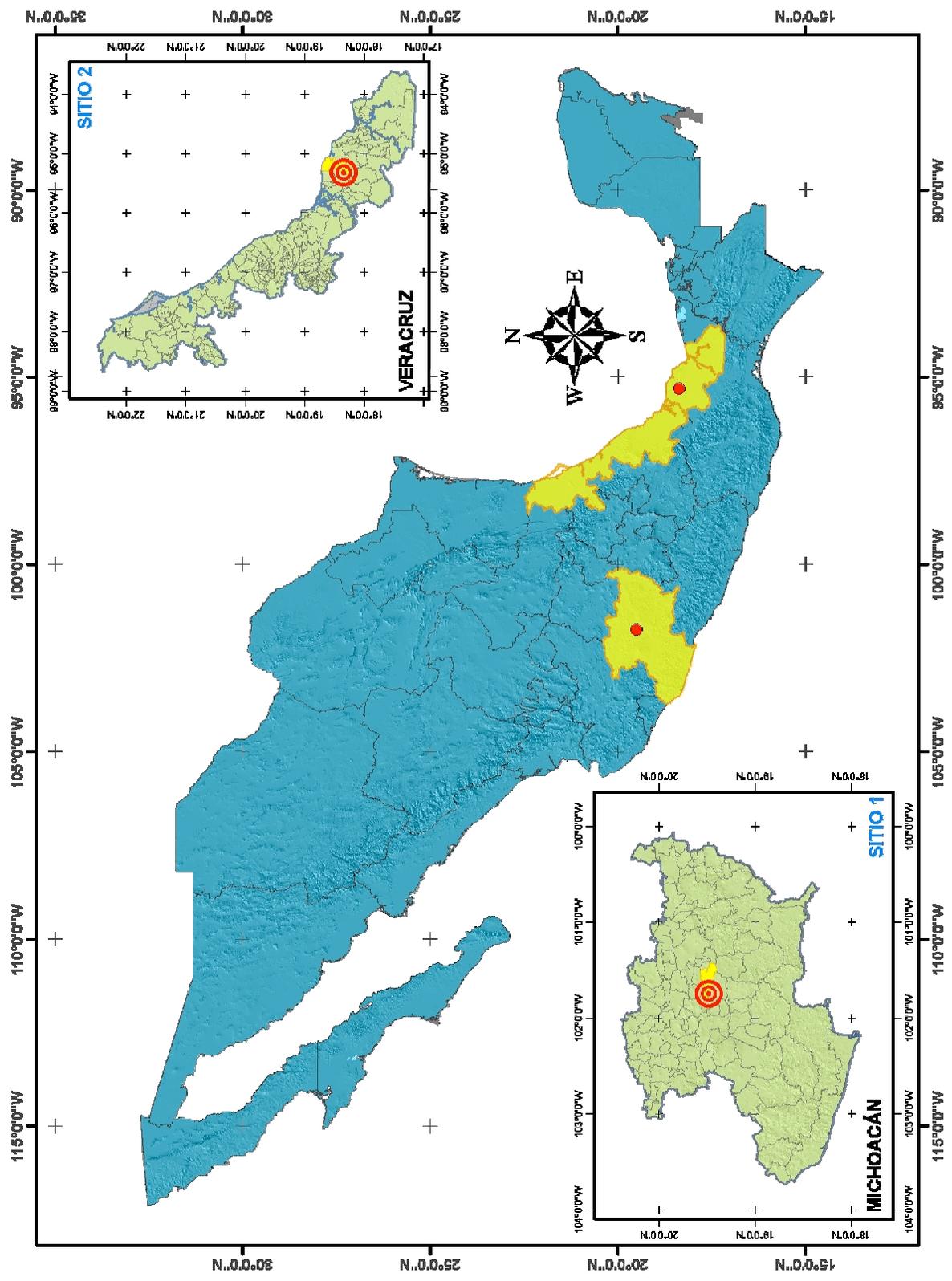


Figura 4. Ubicación de los sitios de estudio.

Presentan una densidad aparente muy baja ( $0.8 \text{ g cm}^{-3}$ ) llegando hasta  $0.5 \text{ g cm}^{-3}$  en algunos Andosoles de tipo húmico, como consecuencia de una alta porosidad. Los horizontes superficiales de estos suelos presentan agregados en forma granular y resistentes al humedecimiento dentro del tamaño entre 0.25 mm a 3.5 mm (Duchaufour, 1977; Ishizuka y Black, 1980).

Generalmente estos suelos son de textura media (franco-arenosa) y se pueden clasificar como del grupo A dentro de la caracterización del NRCS. Los suelos tienen una capacidad de retención de humedad muy alta, la cual puede ser de 100% hasta 200% en el caso específico de Andosoles hidromórficos del trópico (Duchaufour, 1977).

En el sitio 2 la geología dominante es de origen volcánico, principalmente de rocas ígneas y en menor proporción rocas sedimentarias formadas en el Mioceno y Oligoceno (Salas, 1977). Según cartas del INEGI (1987) estos suelos se clasifican como Luvisoles, con régimen del suelo údico y un régimen de temperatura del suelo isohipertérmico (van Wanbeque, 1987). Los suelos presentan textura franco arenosa y se agrupan en suelos de tipo C de acuerdo con la metodología del NRCS. La densidad aparente de estos suelos es mayor a  $1.5 \text{ g cm}^{-3}$ , la que aumenta con la profundidad del perfil; el contenido de materia orgánica varía de 0.3 a 2.7% (Francisco, 2005).

Uribe-Gómez *et al.* (2000) reportaron estos suelos con alta compactación, drenaje deficiente, pH moderadamente ácido y alta saturación de bases. La conductividad hidráulica saturada es de  $2.8 \text{ cm h}^{-1}$ .

#### **4.1.2 Clima**

Según el sistema de clasificación climática de Köppen modificado por García (1973), el tipo de clima para el sitio 1 corresponde al de zonas templadas subhúmedas, con temperatura promedio anual entre  $12 \text{ °C}$  y  $18 \text{ °C}$  ( $Cw_2$ ). En cuanto a la precipitación, según las normales climatológicas de 1971-2000 para la estación con código 16146 (Zirahuén, Salvador Escalante, Michoacán), localizada a 2.6 km del lugar de investigación, el promedio anual es de 1161 mm.

El tipo de clima para el sitio 2 es cálido subhúmedo ( $Aw_2$ ), con lluvias en verano y temperatura media anual superior a los 22 °C (García, 1973). La precipitación promedio anual de la estación San Juanillo con clave 30148 es de 1223 mm.

## **4.2 Descripción de lotes de escurrimiento y sistemas de manejo del suelo**

### **4.2.1 Lotes de escurrimiento**

Para el sitio 1 los lotes presentaron dimensiones de 22.9 x 4 m y pendientes que oscilan entre 9.5 a 10.6%; mientras que en el sitio 2 los lotes tuvieron dimensiones de 25 x 2 m con pendientes entre 14.5 y 17.5%. Los lotes de ambas regiones se delimitaron con láminas de asbesto para dirigir los escurrimientos al final de los mismos.

### **4.2.2 Sistemas de manejo del suelo**

Para el sitio 1 se tienen cuatro sistemas de manejo:

1. Suelo desnudo (SD): sin vegetación mediante el movimiento de la capa superficial del suelo con azadón y su nivelación con el paso de un rastrillo. Estas actividades se realizaron en la época de lluvia para evitar la compactación y encostramiento de la superficie del suelo.
2. Labranza cero (L0): no se realizó movimiento de la capa superficial del suelo y la siembra se hizo en forma directa. Para este sistema se incluyó el uso de residuos o rastrojos de la cosecha anterior (0, 33, 66 y 100% de residuos).
3. Labranza mínima (LM): se realizó con un pase de rastra para preparar el suelo. No se levantaron surcos ni se dejaron residuos de cosecha.
4. Labranza convencional (LC): incluyó las labores de barbecho, rastreado, surcado y escarda, siguiendo el método tradicional del productor (Velásquez, 2006).

En el sitio 2 se contó únicamente con dos sistemas de manejo

1. Labranza convencional (LC): consistió en la quema de residuos de cosecha de maíz al final del año agrícola y roturación del suelo en sentido de la pendiente con arado de tracción mecánica.
2. Labranza de conservación (L0 100%): no se roturó el suelo, se eliminó la quema y el control de malezas se realizó con herbicidas. En promedio se dejaron  $4.10 \text{ t h}^{-1} \text{ año}^{-1}$  de rastrojo de maíz (Francisco, 2005).

### **4.3 Medición de precipitación y escurrimiento**

#### **4.3.1 Precipitación**

La medición de los eventos de lluvia para ambos sitios se hizo a través de pluviógrafos de registro diario instalados en los sitios de estudio.

#### **4.3.2 Escurrimiento**

En el sitio 1, al final de los lotes se contó con un sistema de aforo que consistió de un tanque receptor de agua y sedimentos de 300 L de volumen (Figura 5). El tanque, después de captar cierto volumen, tiene un sistema de desagüe a partir del cual los escurrimientos son drenados; de estos últimos se tomó una alícuota de 1/8 del volumen total que se deposita en un recipiente de 80 L para captar parte del volumen excedido (Velásquez, 2006).



**Figura 5. Sistema de aforo de escurrimientos superficiales en el sitio 1.**

Para el sitio 2, se colocó una malla conectada a una sección triangular con piso inclinado al final de los lotes. Esta sección se conectó a un poliducto de dos pulgadas de diámetro, enterrado, para conducir el escurrimiento a una batería de tres depósitos muestreadores-colectores. Cada 24 horas se midió la altura del escurrimiento en los depósitos, con la cual se calculó la lámina escurrida (Francisco, 2005).

#### **4.4 Análisis de suelo**

Se tomaron muestras de suelo de seis lotes de escurrimiento del sitio 1 (a excepción de L0 100%) el 25 de julio de 2007. Las muestras se extrajeron por medio de una pala recta a 25 cm de profundidad, tomando dos submuestras por cada lote, luego se homogenizaron las muestras y se trasladaron al laboratorio para determinar la textura (Bouyoucus, 1962), contenido de materia orgánica (MO) a través del método de Walkley y Black modificado por Walkley (1947), conductividad hidráulica (K) a saturación en muestras alteradas con carga constante, constantes de humedad del suelo como son la capacidad de campo (CC), punto de marchitez permanente (PMP) y punto de saturación (PS). La densidad aparente ( $D_a$ ) es el único parámetro que se determinó en campo.

Para el sitio 2, debido a que se alteró el manejo de los lotes de escurrimiento, se tomaron en cuenta los datos de Da, MO y textura reportados por Uribe-Gómez *et al.* (2000) para el año de 1995 y por Francisco (2005) para el año 2002. Las constantes de humedad volumétrica a CC, PMP y PS se determinaron por medio de las siguientes ecuaciones (Rawls *et al.*, 1983):

$$CC = 0.3486 - 0.0018(\%arena) + 0.0039(\%arcilla) + 0.0228(\%MO) - 0.0738(Da) \quad (29)$$

$$PMP = 0.0854 - 0.0004(\%arena) + 0.0044(\%arcilla) + 0.0122(\%MO) - 0.0182(Da) \quad (30)$$

$$Ps = 2 \times CC \quad (31)$$

Este análisis tiene como propósito observar el comportamiento de las propiedades hidrológicas del suelo a través del tiempo y por sistema de manejo.

#### **4.5 Análisis de datos de precipitación y escurrimiento**

En ambos sitios, los datos de P y Q correspondieron al periodo de junio a octubre de cada año y se integraron a una base de datos en hojas de cálculo de Excel. Una vez integrada la base de datos, se procedió al análisis de la precipitación y se hizo una comparación entre los dos sitios para observar el comportamiento temporal de las lluvias por medio de medidas de tendencia central y medidas de dispersión. También se analizó como los diferentes sistemas de manejo del suelo influyen en los escurrimientos superficiales en forma temporal.

#### **4.6 Análisis del coeficiente de escurrimiento**

Con los valores de P y Q se determinó el coeficiente de escurrimiento para cada uno de los sistemas de manejo mediante el uso de la ecuación 4. Estos coeficientes se analizaron por evento, de forma mensual y anual, para las diversas condiciones de cobertura del suelo con residuos de cosecha y con el desarrollo del follaje del cultivo del maíz. Para los datos de cobertura del follaje del cultivo se tomaron como referencia los valores reportados por Santos (1995) y Francisco (2005) para los sitios 1 y 2, respectivamente. De los valores de cobertura

reportados por ambos autores se desarrollaron modelos del tipo logístico, debido a que estos son los que presentaron un mejor ajuste, que relacionan la cobertura del follaje con los días después de la siembra del cultivo. Junto a esto se calcularon los grados días desarrollo (GDD) para de igual forma relacionarlos con la cobertura, debido a que este método es más preciso porque considera a la temperatura media del aire, que influye en el desarrollo de organismos como las plantas; además de ser extrapolable a cualquier región de interés.

#### 4.6.1 Modelo de grados día desarrollo

En muchos cultivos los procesos fenológicos y de crecimiento proceden de una relación directa a la temperatura acumulada o tiempo térmico experimentado por el cultivo (Flores, 1994). Para obtener la tasa de desarrollo mediante el método residual se utiliza la ecuación 32:

$$GDD = \sum_{i=1}^D (T_i - T_b) \quad (32)$$

Donde:

GDD = acumulación de grados día desarrollo

D = duración (días)

$T_i$  = temperatura media del aire (°C)

$T_b$  = temperatura base del maíz (°C)

Los datos de temperatura para obtener los GDD correspondieron al periodo de mayo a octubre del año de 1985 para el sitio 1 de la estación con clave 16146, mientras que para el sitio 2 se trabajó con los datos de la estación 30148 para los meses de junio a noviembre para el año 2002 (Anexos 2 y 3).

## 4.7 Descripción de las medidas de dispersión

La desviación estándar ( $s$ ) es la raíz cuadrada de la varianza ( $s^2$ ), la que a su vez se define como la suma de los cuadrados de las desviaciones de las observaciones ( $x_i$ ) con respecto a su media ( $\bar{x}$ ), dividida por el número de observaciones menos uno:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (33)$$

El coeficiente de variación es una medida de la dispersión relativa de un conjunto de datos, que se obtiene dividiendo la desviación estándar del conjunto entre su media aritmética (Infante y Zárate, 1990):

$$CV(\%) = \frac{s}{\bar{x}} \times 100 \quad (34)$$

## 4.8 Determinación de los elementos que intervienen en el método de CN

### 4.8.1 Condición de humedad antecedente (CHA)

Se determinó con la sumatoria de la precipitación acumulada en los cinco días previos al evento de interés; utilizando el rango de clasificación propuesto por Mitchell *et al.* (1993) para las condiciones de humedad seca, media y húmeda debido a que este reportó un mejor ajuste de las curvas numéricas en comparación con el criterio de periodo de crecimiento.

### 4.8.2 Grupo hidrológico del suelo

Con el análisis de las características de los suelos, así como del conocimiento previo que se tiene de ellos, se determinaron los cambios que sufrieron en el tiempo y se agruparon según la clasificación que utiliza el NRCS.

### **4.8.3 Condición hidrológica**

Para este punto se tomó como referencia el porcentaje de cobertura del suelo con los residuos de cosecha y el desarrollo del follaje del cultivo de maíz a partir de la fecha de siembra; posteriormente y según la cobertura del suelo, el sistema de manejo se clasificó en condición buena, regular y mala. Para el sistema de suelo desnudo, la condición hidrológica es invariable a través del tiempo y debido a la eliminación de cubierta vegetal, presenta una condición mala; para los sistemas en los que se presenta el crecimiento del cultivo de maíz (con excepción de L0 66% y L0 100%), en las primeras etapas de desarrollo del cultivo se presenta una cobertura vegetal mala, pero con el desarrollo del follaje del maíz pasa a una condición regular y buena.

### **4.8.4 Uso de suelo**

Este elemento lo constituyen los diversos sistemas de labranza y uso de residuos de cosecha establecidos en los lotes de escurrimiento (Punto 4.2.2).

## **4.9 Obtención de CN**

Para obtener los valores de CN se determinaron inicialmente los valores de S mediante la ecuación 12 y posteriormente se hizo uso de la ecuación 21. Los valores de CN encontrados se analizaron y compararon de acuerdo a los métodos de P-Q y pares ordenados para observar el comportamiento de las curvas numéricas a través del tiempo. Mediante el método natural o de precipitación-escurrimiento se obtuvieron valores mínimos, máximos y medios de CN. Los valores medios ponderados son los que se utilizan para las cuencas. Mediante el método de pares ordenados se obtuvo el valor asintótico al que tiende CN cuando la precipitación se incrementa. Al igual que en la precipitación, escurrimiento y coeficiente de escurrimiento, los valores de CN encontrados se compararon entre sí por medio de medidas de tendencia central y medidas de dispersión en forma temporal y se generaron tablas con valores de las curvas durante el periodo del cultivo.

#### 4.10. Calibración entre los escurrimientos observados y estimados mediante el método de curvas numéricas de P-Q.

La calibración del modelo de curvas numéricas se realizó utilizando los valores medios de CN del Cuadro 20 para la condición de humedad antecedente media (CHA II) y para las abstracciones iniciales de 0.05S y 0.2S. Luego se determinó el valor de S mediante la ecuación 9, posteriormente se estimaron los escurrimientos superficiales mediante la ecuación 7 y se evaluó la bondad de ajuste comparando los escurrimientos observados y los estimados mediante el coeficiente de determinación, que indica el grado de confiabilidad del modelo utilizado.

#### 4.11 Balance hídrico

Este consistió básicamente en medir las entradas de agua (lluvia) y las salidas (escurrimiento, evapotranspiración del cultivo ( $ET_c$ ) y percolación), con lo cual se obtiene el cambio de humedad en el suelo para cualquier día. Se consideró una capa de 75 cm de suelo y la ecuación de balance de agua utilizada fue:

$$\theta f_t = \theta_i + \sum_{i=1}^t (P - Q - ET_c - P_{erc}) \quad (35)$$

Donde:

- $\theta f_t$  = contenido de agua en el suelo el día t (mm)
- $\theta_i$  = contenido de agua en el suelo del día anterior (mm)
- P = precipitación (mm)
- Q = escurrimiento (mm)
- $ET_c$  = evapotranspiración del cultivo (mm)
- $P_{erc}$  = percolación (mm)

La evapotranspiración potencial ( $ET_o$ ) se estimó mediante el método de Penman-Monteith, el cual se basa en un cultivo de referencia (pasto) de 12 cm de altura, ya que ha sido considerado como uno de los métodos que ofrece mejores resultados con un mínimo de error en

relación con el cultivo de referencia (FAO, 1998). Este método requiere datos de radiación, velocidad del viento, temperatura y humedad del aire y se expresa de la siguiente forma:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1+0.34u_2)} \quad (36)$$

Donde:

- $ET_0$  = evapotranspiración de referencia ( $\text{mm d}^{-1}$ )
- $\Delta$  = pendiente de la curva de presión de vapor ( $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ )
- $R_n$  = radiación neta en la superficie del cultivo ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ )
- $G$  = flujo de calor del suelo ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ )
- $\gamma$  = constante psicométrica ( $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ )
- $T$  = temperatura media del aire a 2 m de altura ( $^\circ\text{C}$ )
- $u_2$  = velocidad del viento a 2 m de altura ( $\text{m s}^{-1}$ )
- $e_s$  = presión de vapor a saturación (kPa)
- $e_a$  = presión de vapor actual (kPa)
- $e_s - e_a$  = déficit de presión de vapor a saturación (kPa)

Debido a que en muchas estaciones solamente se cuenta con datos de temperatura y precipitación, existen valores tabulados de algunas de las variables necesarias en este método, facilitando así el cálculo de la  $ET_0$ . Cuando se encontraron datos faltantes de temperatura, estas se generaron mediante el análisis armónico (Serie de Fourier). El valor de la evapotranspiración de referencia se ajustó con el coeficiente de cultivo ( $Kc$ ) para suelo desnudo y para el cultivo de maíz con valores tabulados. Para los sistemas de uso de suelo con residuos de cosecha se utilizó la metodología del manual de la FAO (1998), que establece que  $Kc$  se ve reducido en 5% por cada 10% de superficie del suelo que es cubierta efectivamente con un material orgánico (FAO, 1998).

De las consideraciones anteriores se tienen los siguientes valores de  $K_c$ :

- Suelo desnudo: 0.3 cuando se presenta restricción de agua y 0.4 después de un evento de lluvia (Medina, 2006).
- Cultivo de maíz: 0.3, 1.2 y 0.6 para  $K_{c_{ini}}$ ,  $K_{c_{med}}$  y  $K_{c_{fin}}$ , respectivamente.
- Para los tratamientos con 33, 66 y 100% de residuos de cosecha se hizo la reducción del 5% de los valores de  $K_c$  según la superficie cubierta. Para la región de Pátzcuaro se emplearon los valores de cobertura de suelo reportados por Velázquez (2006), que para L0 33%, L0 66% y L0 100% fueron de 51, 75 y 98%, respectivamente. Para el sistema de manejo de L0 100% en Vistahermosa, se asignó una cobertura del suelo de 78%, debido a que Francisco (2005) reportó una incorporación media de  $4.10 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  para este sistema y según los datos que reportan Velázquez *et al.* (2002), para condiciones del trópico y subtropical, con esta cantidad se cubre el porcentaje de suelo antes mencionado.

El balance hídrico se realizó para el año de 1996 en ambos sitios para el sistema de manejo de LC, y se analizaron la humedad del suelo, precipitación, escurrimiento y coeficiente de escurrimiento para observar su comportamiento durante este año.

#### **4.11.1 Serie de Fourier**

Estas series o funciones son fundamentales para el estudio de los sistemas físicos, sometidos a perturbaciones periódicas. Una función periódica es aquella que se repite por sí misma en intervalos de tiempo igual y puede expresarse como la suma de un número de funciones de senos y cosenos. Esto fue descubierto por el matemático francés Joseph Fourier en el año de 1807 (Chapra y Canale, 1987).

El análisis armónico aplicado a la agroclimatología se realizó por primera vez y con éxito en la estimación de valores diarios a partir de normales climatológicas mensuales de temperatura, precipitación y evaporación (Neild *et al.*, 1977). La estimación de valores diarios permitió generar parámetros muy útiles, entre los que destacan los desarrollados por Neild (1982) y Neild y Logan (1984) quienes crearon los programas de CLIGEN y AGCLIM.

Una función periódica presenta la siguiente forma:

$$f(x) = \beta_0 + A \cos(wx - wx_0) \quad (37)$$

Donde:

$f(x)$  = valor estimado

$\beta_0$  = valor medio del ciclo

$A$  = frecuencia angular, dado por  $w = 2\pi T^{-1}$ , siendo  $T$  el ciclo o periodo

$x$  = unidades del ciclo (tiempo o valor angular)

$x_0$  = tiempo o valor angular en que ocurre la acrofase (máximo del valor estimado)

Los valores de  $T$  pueden tomar las siguientes unidades:

- Tiempo: meses (1-12), días (1-365), horas (1-24)
- Angulares: grados, radianes.

## V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Si bien es cierto los datos de precipitación y escurrimiento se analizaron durante el periodo 1996-2001, los cambios en las propiedades hidrológicas del suelo por sistema de manejo se compararon desde el año de 1986 al 2007 para el sitio 1 y desde el año 1995 al 2002 para el sitio 2, ya que únicamente se contó con información de estos años para realizar el análisis. Asimismo, se discute la variabilidad temporal de la precipitación, sus interacciones con los escurrimientos y la variabilidad temporal de los coeficientes de escurrimiento y curvas numéricas en cada uno de los sistemas de manejo del suelo y la vegetación de los sitios estudiados.

### 5.1 Variabilidad de las características de los suelos de los sitios analizados

En el sitio 1, durante el año de 1986 la densidad aparente de los suelos fue de  $0.66 \text{ g cm}^{-3}$  y con el uso de residuos de cosecha (33 y 66%) se observa un decremento del 6 y 3%, respectivamente para el año 2007; atribuible a las modificaciones de los contenidos de materiales orgánicos en los suelos que ocasionan los residuos de cosecha. Los sistemas de SD y L0 0%, presentaron los valores más bajos de  $D_a$ , lo que puede deberse a lo que reportan Dardanelli y Gil (1997), quienes atribuyen una recuperación de los suelos con la falta de remoción, lo que origina valores más bajos de esta característica (Cuadro 9). Respecto a la labranza convencional y labranza mínima se aprecia un ligero incremento en la  $D_a$  que puede ser atribuible al uso de implementos agrícolas que aumentan la compactación del suelo y reducen el material orgánico en el suelo, especialmente en LC. Otro aspecto a considerar es que las características texturales están directamente asociadas a las propiedades de los suelos. Dicha textura no cambia fácilmente con el manejo de suelo, por lo que los cambios texturales se pueden asociar además a una variación espacial natural del suelo o por efecto de la erosión.

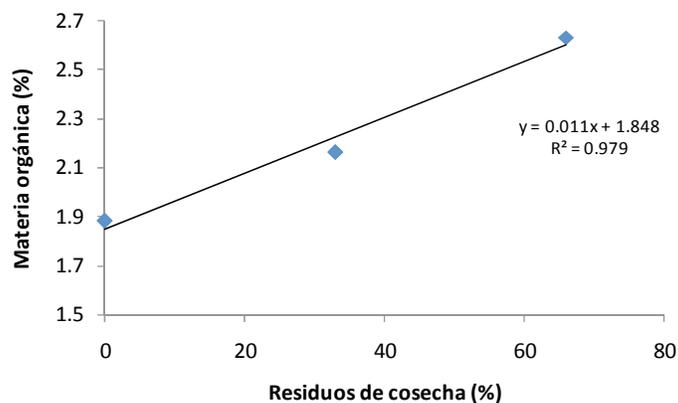
**Cuadro 9. Propiedades del suelo para diferentes sistemas de manejo del suelo en el sitio 1.**

Característica	1986 <sup>u</sup>		2007				
	LC <sup>v</sup>	SD	L0 0%	L0 33%	L0 66%	LM	LC
Da <sup>w</sup> (g cm <sup>-3</sup> )	0.66	0.61	0.58	0.62	0.64	0.72	0.67
Arena (%)	33.0	50.0	53.0	44.0	47.0	49.0	43.0
Limo (%)	40.0	25.0	27.0	32.0	29.0	29.0	27.0
Arcilla (%)	27.0	25.0	20.0	24.0	24.0	22.0	30.0
MO <sup>x</sup> (%)	2.05	1.28	1.88	2.16	2.63	2.55	2.27
K <sup>y</sup> (cm h <sup>-1</sup> )	2.65	13.30	8.50	5.20	8.50	9.10	6.90
CC <sup>z</sup> (%)	66.54	81.00	70.70	73.1	69.3	59.40	61.10
PMP <sup>z</sup> (%)	33.6	57.60	49.20	48.5	46.70	43.60	40.90
PS <sup>z</sup> (%)	103.62	106.7	103.70	99.30	103.80	85.80	81.90

<sup>u</sup> = año, <sup>v</sup> = sistemas de manejo de suelo, labranza convencional (LC), suelo desnudo (SD), labranza cero (L0) con residuos de cosecha (0, 33, 66 y 100%), labranza mínima (LM), <sup>w</sup> = densidad aparente, <sup>x</sup> = materia orgánica, <sup>y</sup> = conductividad hidráulica, <sup>z</sup> = porcentaje de contenido de humedad del suelo en forma gravimétrica a capacidad de campo (CC), punto de marchitez permanente (PMP) y punto de saturación (PS)

Los valores encontrados coinciden con los valores típicos de Da reportados por Maeda *et al.* (1977) quienes establecen que debido a la alta porosidad de estos suelos, los valores fluctúan entre 0.3 a 0.8 g cm<sup>-3</sup>. Asimismo, estos datos fundamentan los reportado por Chapa (1987), quien menciona que la aplicación de energía externa por medio de las herramientas agrícolas no provocan cambios significativos en las propiedades físicas de un suelo Andosol mólico.

En relación al contenido de MO del suelo con la incorporación de residuos de cosecha para el sistema de manejo de L0, se encontró una relación directamente proporcional, en donde al incrementarse la cantidad de residuos dejados en campo, aumenta el contenido de MO (Figura 6). Esto coincide con lo reportado por Velázquez (2006) y quien señala valores de carbono total de 3.8, 3.9, 3.6, 3.0, 2.2 y 1.5% para los sistemas de manejo de L0 100%, L0 66%, L0 33%, L0 0%, LC y SD, respectivamente. Tapia (1999) reportó que el sistema de labranza L0 100% es capaz de mantener y de incrementar la cantidad de MO en la capa superior, mientras que la LC presentó una reducción en su concentración. Durante cuatro ciclos de manejo del cultivo de maíz este autor encontró un valor inicial de MO igual a 2.37% para el primer ciclo y 4.31% para el cuarto ciclo en L0 100%, en cambio para LC se observaron valores de 2.30% a 2.01% para los mismos ciclos.



**Figura 6. Porcentaje de MO en el suelo según los residuos de cosecha para el sistema de manejo L0 en el sitio 1.**

El sistema de SD presentó el valor más bajo de MO, con 1.28% ya que estuvo expuesto a un proceso erosivo acelerado y con el paso del tiempo (21 años) se ha presentado la pérdida de una capa aproximada de 20 cm y ha aflorado el horizonte B como características más acentuadas del material parental. Destaca que el contenido de MO a partir del año de 1986 al año 2007 se ha incrementado en 24 y 11% para LM y LC, respectivamente, lo que indica que en estos sistemas agrícolas con movimiento de suelo por laboreo no se presenta una degradación de la materia orgánica a pesar de no haberse incorporado residuos de cosecha. Sin embargo, para el sistema de L0 0% se encontró una ligera disminución de 8% que podría ser atribuido a problemas de muestreo o del método de estimación ya que en este caso tampoco hubo adición de residuos y solo siembra directa.

La conductividad hidráulica presentó cambios considerables con el paso del tiempo, para el caso, se dio un aumento de esta característica en 243 y 160% para LM y LC, respectivamente. Esta diferencia puede ser atribuible a la metodología empleada ya que para el análisis de 1986 se utilizaron muestras inalteradas de suelo, en cambio para esta investigación se emplearon muestras alteradas, pasadas por tamiz de 2 mm y puestas a saturación en un permeámetro de carga constante.

Otra posible explicación en cuanto a la diferencia en la conductividad hidráulica puede ser debido a lo reportado por Velásquez *et al.* (1997), quienes establecen que el uso de cobertura

con residuos de maíz y sin hacer movimiento del suelo duplica la tasa de infiltración y disminuye en más de 50% los escurrimientos superficiales. Tiscareño *et al.* (1998) reportaron que la conductividad hidráulica a saturación con la labranza de conservación puede incrementarse de 0.54 a 5.98 cm h<sup>-1</sup> en estos suelos por los efectos de la cobertura acumulada en cinco años bajo este sistema. En forma aditiva se puede señalar que después de diez años de manejo, con el uso de residuos la conductividad hidráulica aumentó hasta 8.5 cm h<sup>-1</sup>, para el caso de L0 66%. Esto es consistente cuando se utilizan residuos en la labranza de conservación y resulta de gran importancia porque se reducen los volúmenes escurridos, aumenta la infiltración del agua en el suelo y se reduce la capacidad de remoción y transporte de las partículas del suelo por la lluvia y el escurrimiento (Velázquez, 2006). Sin embargo, los sistemas de labranza sin residuos como la LC y LM también reportan altas conductividades hidráulicas, lo que confirma el hecho que la metodología de estimación de esta variable hidrológica es determinante para validar estos cambios.

Las constantes de humedad del suelo a CC y PS presentaron una reducción para LM y LC y un ligero incremento cuando se utilizaron los residuos de cosecha, lo que indica que el aumento en los contenidos de materia orgánica se refleja en la capacidad de retención del agua en el suelo. El sistema de manejo del suelo de SD presentó el valor más alto de la capacidad de campo, incrementándose 22%, hecho atribuible a lo señalado previamente respecto a la recuperación de los suelos cuando no se realiza movimiento alguno, lo que permite una mayor capacidad de retención de agua a pesar de haber perdido materia orgánica.

Debido a que estos suelos son muy susceptibles al proceso de secado y en donde se dan cambios irreversibles en las propiedades físicas del suelo con este proceso, puede atribuirse a este factor la diferencia respecto a las constantes de humedad a PS y PMP.

Como se pudo observar, los cambios reportados en las propiedades hidrológicas del suelo del sitio 1 (Da, MO y constantes de humedad) indican que con la labranza de conservación en mayor proporción y en menor proporción con los otros sistemas de labranza se modifica la capacidad de paso del agua en el suelo que es determinante en la relación precipitación escurrimiento que se está estudiando.

En el sitio 2, la Da aumentó en el transcurso de 7 años 21 y 28% para L0 100% y LC, respectivamente. Esto puede deberse a que los datos de 1995 fueron tomados en condiciones de ladera menos alteradas, mientras que en el 2002 las muestras corresponden a sedimentos acumulados en la parte baja de la terraza. (Cuadro 10).

**Cuadro 10. Propiedades del suelo para diferentes sistemas de manejo en el sitio 2.**

Característica	1995	2002	
	Terraza muro vivo <sup>w</sup>	LC <sup>x</sup>	L0100% <sup>y</sup>
Da (g cm <sup>-3</sup> )	1.4	1.8	1.7
MO (%)	4.7	0.9	1.9
Arena (%)	35.4	30.0	21.5
Limo (%)	48.3	29.0	41.0
Arcilla (%)	16.3	41.0	37.5
CC <sup>z</sup> (%)	35.2	34.1	37.3
PMP <sup>z</sup> (%)	17.5	23.1	23.4
PS <sup>z</sup> (%)	70.4	68.1	74.6

<sup>w</sup> = Muestras tomadas a profundidad de 32 cm, <sup>x</sup> = profundidad de muestreo de 44 cm, <sup>y</sup> = profundidad de muestreo de 40 cm, <sup>z</sup> = porcentaje de contenido de humedad del suelo en forma volumétrica (ecuaciones 29, 30 y 31)

La reducción de MO en la labranza convencional se asocia a la quema de residuos de cosecha y a la remoción de partículas del suelo y material orgánico que originó la erosión hídrica. Para este caso el contenido de materia orgánica en el sistema de LC es menor 5.2 veces que el encontrado en 1995. Sorprende que los contenidos de materia orgánica disminuyan con el uso del sistema de L0 100% lo cual se puede atribuir al proceso de muestreo al inicio y final de los trabajos ya que era de esperarse que se mantuviera o se presentara un incremento en el contenido de MO provocado por el uso de residuos de cosecha y aunado a esto, los datos no pudieron ser comprobados porque se alteró el manejo del sitio experimental.

Los contenidos de arena muestran una ligera reducción con el tiempo y un pequeño incremento en los contenidos de arcillas para los sistemas de LC y de L0 100% que puede deberse a la forma en que se realizaron los muestreos y fue previamente discutido, a la profundidad de muestreo y los procesos erosivos señalados. Según Pape y Legger (1994), el limo

es fácilmente erosionable, especialmente cuando se presenta en superficies con pendiente, y como se aprecia en el Cuadro 10, se presentó una reducción en ambos sistemas, pero fue mayor la pérdida para LC debido al proceso erosivo; mientras que, los residuos de cosecha en L0 100% protegieron al suelo del arrastre de partículas, de lo cual la reducción de limo fue menor en este sistema de manejo.

Al considerar los pequeños cambios en las diferentes fracciones de partículas del suelo para 1995 y 2002 y estimar las constantes de humedad del suelo en el transcurso de siete años no se aprecia cambios considerables, especialmente para CC (Cuadro 10). El sistema de LC presento una reducción de 3% para CC, mientras que L0 100% aumento en 6%. El PMP para los sistemas evaluados en el 2002 fue prácticamente el mismo y al ser comparados con el valor encontrado en 1995, estos lo superan en 32 y 34% para LC y L0 100%, respectivamente.

De este análisis se puede concluir que las condiciones hidrológicas de los suelos en el sitio 2 no permiten identificar los cambios multitemporales y de manejo del suelo, ya que el muestreo realizado no se definió para este propósito sino para caracterizar el suelo estudiado. Debe destacarse que las tasas de erosión de los sistemas de manejo son muy variables ya que en 8 años de estudio en el sistema de LC, Francisco (2005) reportó una erosión acumulada de 1177 toneladas ( $146 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  en promedio) lo que sugiere que se perdió una capa de 9 cm de suelo; mientras que, en el sistema de L0 100% en el mismo periodo, se perdieron por erosión únicamente 7 toneladas ( $0.85 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  en promedio), lo que indica la pérdida de 1 mm de suelo, situación que permite inferir fuertes cambios en la propiedades hidrológicas del suelo sometido a la labranza convencional en comparación con la labranza de conservación (L0 100%).

Esta información permite establecer que las prácticas de manejo del suelo modifican las propiedades hidrológicas de los suelos en el tiempo y que estas deben ser analizadas para tratar de explicar la alta variabilidad multitemporal de las relaciones precipitación-infiltración-escurrimiento. Consecuentemente, el conocer estas variaciones permitirán encontrar modelos dinámicos con parámetros que respondan no solo a los cambios en los contenidos de humedad del suelo y la protección de la vegetación, sino a los cambios en las propiedades hidrológicas de los suelos como ha sido propuesto por Neitsch *et al.* (2005).

## **5.2 Análisis de la precipitación en los dos sitios de estudio**

Para poder comparar el comportamiento de la precipitación anual, mensual y por evento en los sitios 1 y 2 se consideraron los valores de la base de datos registrados durante los meses de junio a octubre para el periodo de 1996 a 2001.

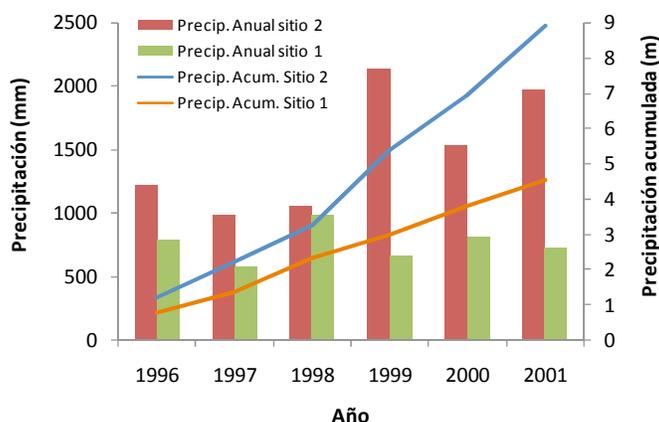
### **5.2.1 Precipitación anual**

La precipitación que se presentó en los meses de junio a octubre<sup>1</sup> para el sitio 2 fue mayor que la del sitio 1 en el periodo de 1996 a 2001. En el sitio 1, la precipitación media para este periodo fue de 762.9 mm con un rango de variación de 573.5 a 984 mm y una desviación estándar de 143.5 mm, mientras que para el sitio 2, la precipitación media fue de 1487 mm, un rango de variación de 983.3 a 2138 mm, con una desviación estándar de 484 mm, lo que sugiere que existe una alta variación temporal de la precipitación en las zonas de trabajo (Figura 7).

La precipitación media registrada para el sitio 1 durante los seis años (periodo de junio a octubre) se encuentra por debajo de la media que reportan las normales climatológicas 1971-2000 ya que esta es de 990.2 mm (Estación 16146); en cambio, para el sitio 2 todos los años presentaron valores de precipitación por encima de la media (978 mm) según datos de la estación con código 30148. En los sitios 1 y 2 la precipitación para los meses de junio a octubre es del 85 y del 80%, respectivamente en relación con la precipitación total anual reportada en las normales climatológicas.

---

<sup>1</sup> En este caso la precipitación de los meses de junio a octubre se considera como la precipitación anual ya que en este periodo se realizaron la medición de precipitación y escurrimiento en ambos sitios.



**Figura 7. Distribución anual de la precipitación durante el periodo 1996-2001 en los dos sitios de estudio.**

La precipitación acumulada en seis años para el sitio 2 fue de 8.9 m mientras que para el sitio 1 fue de 4.6 m, lo que indica que se tienen dos regímenes de precipitación distinto, lo que es explicado por el tipo de clima característico de zonas templadas subhúmedas para el sitio 1 y cálido subhúmedo para la localidad de Vistahermosa, Ver.

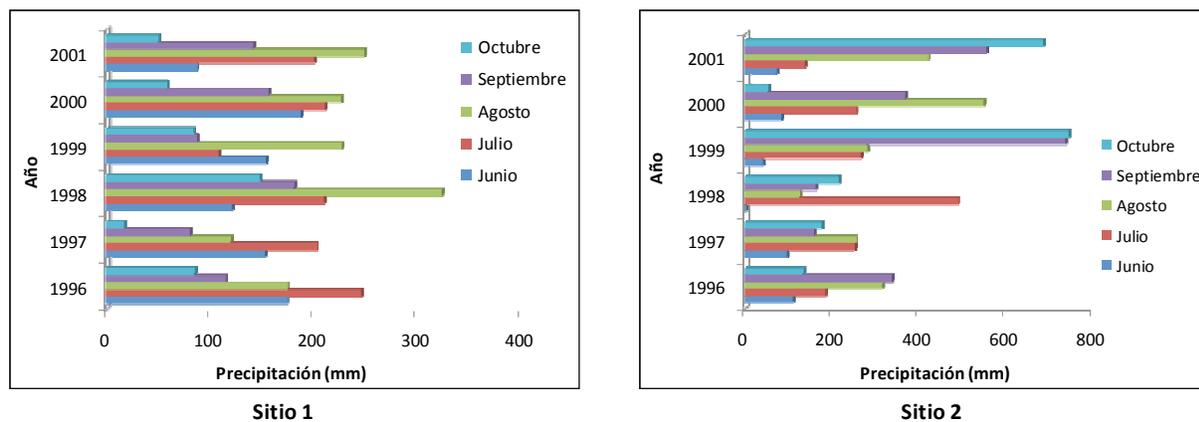
### 5.2.2 Precipitación mensual

La variación de la precipitación mensual en el periodo de observación se presenta en el Cuadro 11. Para el sitio 1, el mes con menor precipitación promedio correspondió a octubre con 73.7 mm, mientras que en el mes de agosto fue donde se presentó la mayor cantidad de lluvia (220.1 mm). El rango de variación de la precipitación osciló entre 80 y 324 mm y el mes de octubre presentó un mayor coeficiente de variación (59.8%). El sitio 2 presentó valores de precipitación mensual superiores a las del sitio 1, siendo junio el mes con menor lluvia promedio (65.2 mm) y el mes lluvioso fue septiembre con una lámina promedio para los seis años de 378.8 mm. En este sitio se dio un mayor rango de variación debido a que la lluvia varió de 39 a 739 mm y al igual que el sitio 1, el mes de octubre presentó el mayor CV (90%).

**Cuadro 11. Variación temporal de la precipitación (en mm) en los sitios de estudio.**

Sitio	Variable	Mes				
		Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre
1	Precipitación mínima	87.0	108.0	120.0	80.0	17.5
	Precipitación máxima	187.0	245.6	324.0	181.0	148.0
	Precipitación media	146.0	196.3	220.1	126.8	73.7
	Desviación estándar	36.6	46.2	69.0	39.6	44.1
	CV (%)	25.1	23.6	31.4	31.2	59.8
2	Precipitación mínima	19.0	124.2	113.6	158.2	51.2
	Precipitación máxima	109.5	409.2	525.8	739.0	742.1
	Precipitación media	65.2	246.2	312.2	378.8	328.9
	Desviación estándar	39.6	95.7	138.2	220.6	299.0
	CV (%)	60.7	38.9	44.3	58.2	90.0

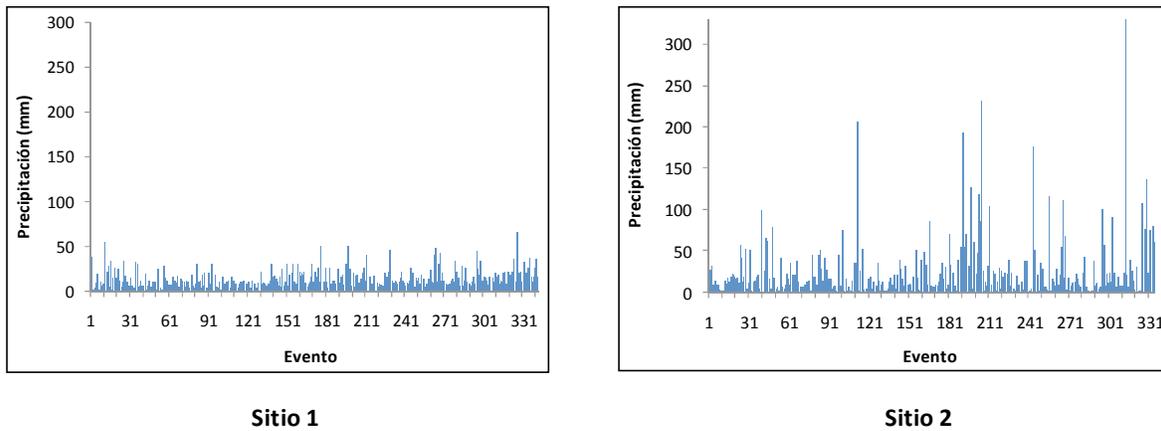
Se presenta de forma gráfica en la Figura 8 la variación mensual de la precipitación registrada en ambos sitios, donde el mayor evento de lluvia para el sitio 1 no supero los 400 mm; en cambio para el sitio 2 se presentaron tres precipitaciones mensuales por arriba de los 600 mm.



**Figura 8. Distribución de la precipitación en forma mensual para los dos sitios de estudio.**

### 5.2.3 Precipitación por evento

La lámina máxima precipitada para el sitio 1 fue de 65 mm, mientras que para el sitio 2 fue de 329.7 mm, lo que indica una alta variabilidad de las lluvias para este último sitio (Figura 9).



**Figura 9. Precipitación por evento para los sitios en estudio.**

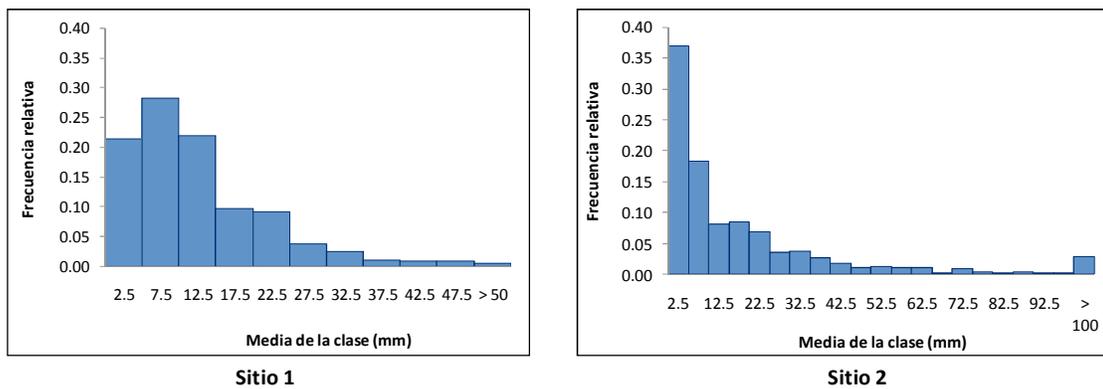
El análisis de la lluvia por evento muestra que la precipitación media del sitio 2 es 83% mayor en comparación a la ocurrida en el sitio 1. La lluvia mínima registrada es similar en ambos sitios; por otra parte, la lluvia máxima registrada en 24 h del sitio 2 es cinco veces mayor que en el sitio 1. Esto indica que la precipitación por evento en la región de Vistahermosa tiene mayores posibilidades de satisfacer la capacidad de infiltración del agua en el suelo y producir mayores escurrimientos que en el sitio 1 (Cuadro 12).

**Cuadro 12. Análisis de la precipitación (en mm) por evento en los sitios de estudio.**

Variable	Sitio 1	Sitio 2
N	342	335
P. mínima	1.0	1.6
P. máxima	65.0	329.7
P. media	13.4	24.6
Desv. estándar	10.0	35.0
CV (%)	75.0	142.0

La precipitación diaria agrupada permitió obtener las frecuencias relativas que muestran un comportamiento que se asemeja a una distribución probabilística del tipo Log Normal, que se caracteriza por tener su coeficiente de asimetría positivo, lo que indica una concentración de datos hacia la derecha de la media. El sitio 1 presenta una menor variabilidad en los datos de lluvia por evento respecto al sitio 2 debido a que posee una desviación estándar que es 3.5 veces inferior, así como un *CV* de 75% en comparación con 142% del sitio 2. Por lo que es de esperarse precipitaciones mayores y una mayor dispersión de estos eventos en el sitio 2 por los resultados obtenidos de este análisis.

La mayor frecuencia de los eventos de precipitación para el sitio 1 se presentó entre los 5 y 10 mm (26%); mientras que, en el sitio 2 fue de 37% dentro del rango de 0 a 5 mm. Únicamente 1% de las precipitaciones presentaron valores superiores a 50 mm en el sitio 1, en comparación con 8.8% registrado en el sitio 2 (Figura 10).



**Figura 10. Frecuencia relativa de la precipitación en los sitios de estudio.**

La variabilidad de la precipitación encontrada sugiere la necesidad de analizar la lluvia diaria ocurrida en los meses para conocer esta aleatoriedad en el tiempo y su impacto en la producción de escurrimientos en los diferentes sistemas evaluados por sitio. En ambas localidades, agosto se presentó como el mes con mayor número de días con eventos de precipitación, 99 y 87 para los sitios 1 y 2, respectivamente. La precipitación media por evento para el sitio 1 varió de 12.5 a 14.3 mm y para el sitio 2 de 17.2 a 31.8 mm y si bien es cierto se mencionó que la lluvia máxima en 24 h para el sitio 1 fue de 65 mm, en el resto de los meses se

dieron eventos de más de 44 mm; mientras que en el sitio 2 se dieron lluvias máximas en 24 h superiores a 176.5 mm, con excepción del mes de junio cuya precipitación máxima fue de 42.2 mm (Cuadro 13).

**Cuadro 13. Análisis de la precipitación (en mm) por evento agrupado en forma mensual para los sitios de estudio.**



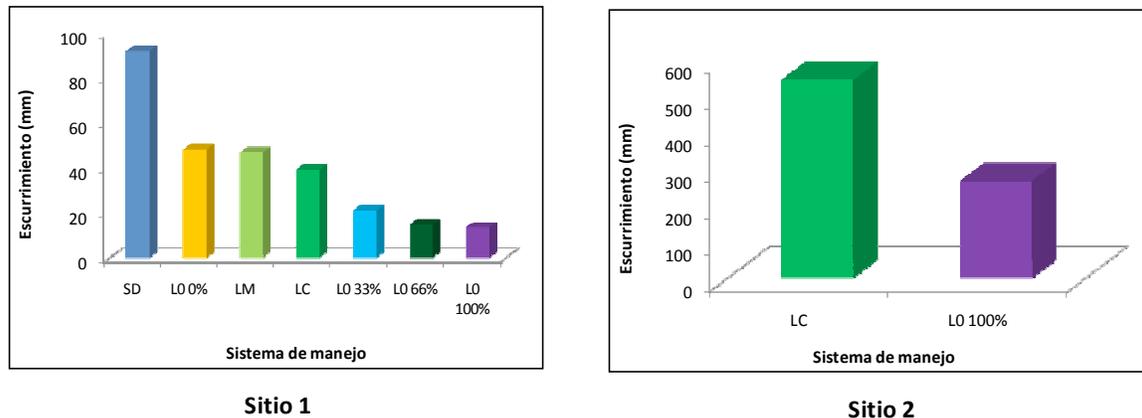
\* Se refiere a los sitios 1 y 2.

Es en el sitio 2 donde se da la mayor variabilidad de los eventos de lluvia debido a que se presentaron valores de desviación estándar de 3.3 a 3.8 superiores a las obtenidas en el sitio 1, de igual forma se presentaron coeficientes de variación superiores en el sitio 2.

### **5.3 Análisis de los escurrimientos por sistema de manejo del suelo para los dos sitios**

#### **5.3.1 Escurrimiento anual**

Los escurrimientos medios anuales como producto de la precipitación y los sistemas de manejo muestran una tendencia a reducirse a medida que aumenta la cobertura vegetal y los residuos de cosecha para los dos sitios, como ha sido reportado por Velázquez (2006) y Francisco (2005) y cuya tendencia de reducción se observa en la Figura 11.



**Figura 11. Efecto de los sistemas de manejo en la producción de escurrimientos en los sitios de estudio.**

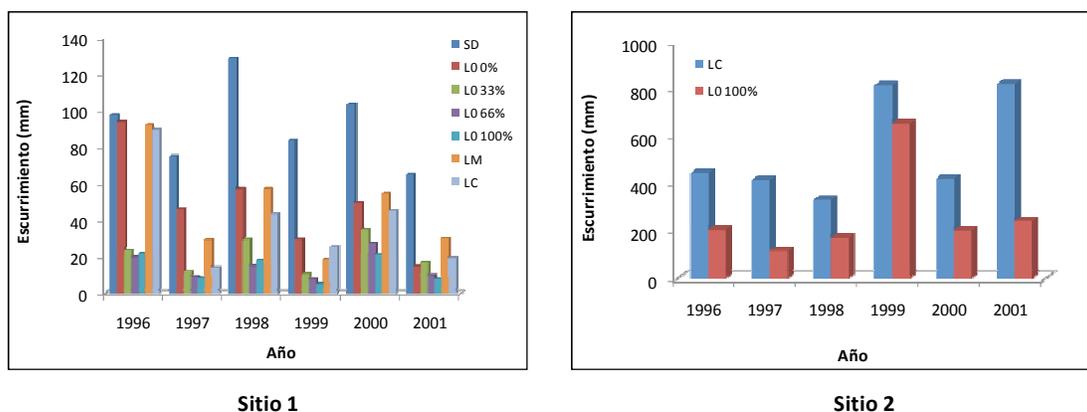
El impacto de los sistemas de manejo del sitio 1 muestran que con prácticas agronómicas sencillas se pueden reducir los escurrimientos medios superficiales e indica que con el uso de 100% de residuos de cosecha se logra una reducción de 26 mm si se compara con LC, lo que da una eficiencia del rastrojo de 65.6% para reducir el escurrimiento; mientras que, en el sitio 2 con el sistema de LO 100% se logró reducir la lámina escurrida en 277 mm anuales al compararse con los escurrimientos observados en LC, lo que representa una eficiencia de 51%.

Al analizar los flujos superficiales anuales se observa que SD del sitio 1 presentó los escurrimientos más altos, con un rango de variación entre 65.5 y 128.6 mm, con una media de 92.5 mm y CV de 24.5%. Los sistemas de manejo de LO 33%, LO 66% y LO 100% presentaron los menores escurrimientos con valores medios anuales de 21.1, 14.8 y 13.6 mm respectivamente, con desviación estándar superior a 7.4 mm y coeficientes de variación de más de 46%, situación que se explica por la alta variabilidad de la lluvia anual señalado anteriormente y por el efecto de desarrollo de la vegetación durante el ciclo del cultivo (Cuadro 14).

**Cuadro 14. Variabilidad de los escurrimientos medios anuales en los dos sitios de estudio.**

Sistema	Sitio 1			Sitio 2		
	Escurrencimiento medio anual (mm)	Desviación estandar (mm)	CV (%)	Escurrencimiento medio anual (mm)	Desviación estandar (mm)	CV (%)
SD	92.5	22.7	24.5			
L0 0%	48.5	27.0	55.7			
L0 33%	21.1	9.8	46.2			
L0 66%	14.8	7.8	52.7			
L0 100%	13.6	7.4	54.5	266.2	195.6	40.1
LM	47.1	27.0	57.4			
LC	39.5	27.6	69.7	543.1	217.6	73.5

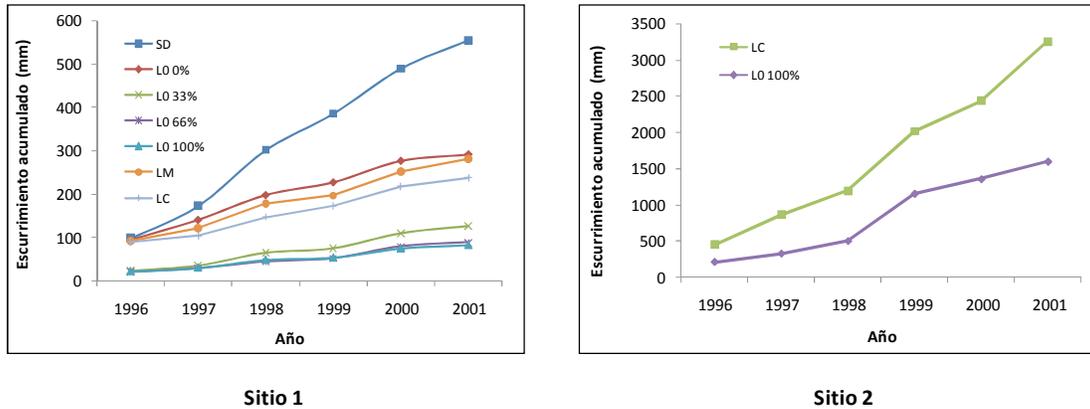
La Figura 12 permite apreciar en forma gráfica la variabilidad de los escurrimientos en forma anual para los diferentes sistemas de manejo en ambos sitios.



**Figura 12. Escurrencimiento medio anual por sistema de manejo en los dos sitios de estudio.**

Respecto a la lámina escurrida acumulada, SD presentó el valor más alto de flujo superficial con 554.8 mm, seguido de L0 0% y LM con 291.2 y 282.7 mm, respectivamente, todos ellos para el sitio 1. En el sitio 2, y de acuerdo a lo que se ha venido explicando previamente, como la alta variabilidad y mayor cantidad de lluvia para este lugar, así como al tipo de suelo con condiciones de producir mayor escurrimiento y mayor gradiente de pendiente de los lotes de escurrimiento; la lámina escurrida acumulada fue de 3259 mm para LC y de 1597 mm para L0 100%. En ambos sitios se aprecia claramente el efecto que producen la incorporación de los residuos en los escurrimientos y que en el sitio 1, los sistemas de L0 66% y L0 100% presentaron una lámina escurrida muy parecida (88.5 y 81.5 mm, respectivamente), de

lo que se puede establecer que dejar en campo el 66% de residuos se obtiene el mismo efecto que dejar la totalidad de estos para la reducción de los escurrimientos (Figura 13).



**Figura 13. Esguerrimiento acumulado para distintos sistemas de manejo en los sitios de estudio.**

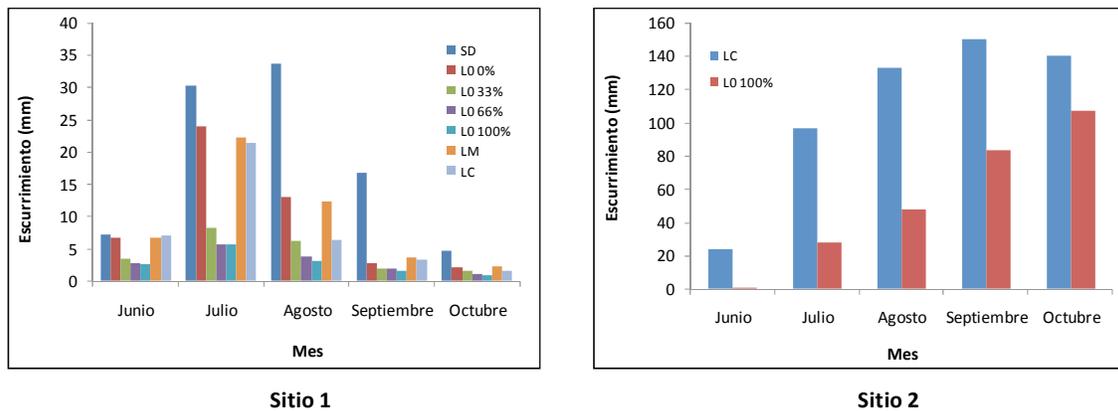
De lo discutido anteriormente se puede concluir la importancia de los residuos de cosecha en la reducción de los escurrimientos, tal como lo reportan autores como Macías (1992) quien establece que el sistema de labranza convencional sin cultivo y con incorporación de residuos de maíz redujo el escurrimiento en 71%, respecto al mismo tratamiento sin residuos. Velásquez (2006) por su parte reportó que el no laboreo del suelo y el uso de residuos de cosecha de maíz inciden en la reducción de los escurrimientos hasta en 83%, al disminuir la velocidad del escurrimiento e incrementar el tiempo para que el agua se infiltre en el suelo.

### 5.3.2 Esguerrimiento mensual

Los escurrimientos superficiales medios en forma mensual, presentan una tendencia a reducirse a medida en que se incorporaron residuos de cosecha, así como al desarrollo de follaje del cultivo de maíz, especialmente en el sitio 1. El suelo desnudo presentó los escurrimientos medios más altos, en especial durante los meses de julio y agosto con 30.3 y 33.6 mm, respectivamente. La reducción que se observa en este sistema para los meses de septiembre y octubre se debe a una menor precipitación, a diferencia del resto de los sistemas en donde el

efecto de menor escurrimiento en todo el periodo del cultivo se debe al tipo de preparación de suelo, residuos de cosecha y desarrollo de follaje del cultivo. Los sistemas de L0 66% y L0 100% presentan un comportamiento parecido en todos los meses y se confirma que también a escala mensual, dejar 66% de residuos brinda una eficiencia en la reducción de los escurrimientos similar a la que proporciona dejar la totalidad de biomasa en campo.

En el sitio 2 se observa un comportamiento ascendente de los escurrimientos, lo que indica que las lluvias satisfacen la tasa de infiltración del suelo y por ende se dan escurrimientos mayores y no se observa el efecto del follaje del maíz para reducir los flujos; sin embargo, el uso de residuos de cosecha si representa una alternativa para controlar el movimiento superficial del agua. Muestra de ello es que el sistema de L0 100% presentó una reducción de los escurrimientos que variaron desde 23.6% en el mes de octubre hasta 97% en junio en comparación con LC (Figura 14).



**Figura 14. Escurrimiento medio mensual para diferentes sistemas de manejo en los sitios de estudio.**

### 5.3.3 Escurrimiento por evento de precipitación

A nivel de evento para todos los sistemas de ambos sitios, se observaron escurrimientos mínimos parecidos que variaron entre 0.002 y 0.004 mm. Las diferencias se dieron en los escurrimientos máximos y medios. El sistema LC del sitio 2 presentó un escurrimiento medio que fue superior 13.9 veces al observado en el sitio 1, mientras que L0 100% del sitio 1 es superado en 22.9 veces por el mismo sistema del sitio 2. El sistema de SD fue el que reportó una mayor lámina escurrida en el sitio 1 (1.7 mm); mientras que, L0 66% y L0 100% fueron los que menores escurrimientos por evento generaron con 0.26 y 0.24 mm, respectivamente.

A excepción de SD, el resto de los sistemas del sitio 1 presentaron coeficientes de variación similares entre 218.82 y 248.65%. Por otro lado, en el sitio 2 el sistema de LC presentó un valor de CV igual a 213.57%; mientras que, L0 100% se destaca como el sistema con mayor CV para ambos sitios, lo que indica una fuerte variabilidad de los datos obtenidos (Cuadro 15).

**Cuadro 15. Variabilidad de los escurrimientos superficiales por evento en los dos sitios de estudio.**

Variable	Sitio 1						Sitio 2		
	SD	L0 0%	L0 33%	L0 66%	L0 100%	LM	LC	L0 100%	LC
Q mínimo (mm)	0.002	0.003	0.002	0.004	0.002	0.002	0.002	0.003	0.002
Q máximo (mm)	8.120	10.040	7.820	7.820	6.130	9.070	8.950	145.310	218.940
Q medio (mm)	1.680	0.850	0.370	0.260	0.240	0.830	0.700	5.490	9.730
Desv. est. (mm)	2.410	1.860	0.920	0.580	0.530	1.860	1.640	17.400	20.780
CV (%)	143.45	218.82	248.65	223.08	220.83	224.10	234.29	316.94	213.57

Del análisis de los escurrimientos se puede establecer que al igual que la precipitación, se da una gran variabilidad en ellos a distintas escalas temporales, siendo mayor a nivel de eventos ocurridos y de cómo las prácticas de incorporación de residuos y sistemas de manejo contribuyen a la reducción de los flujos superficiales, con lo que se previene la pérdida y degradación del suelo.

## 5.4 Relación precipitación-escorrentía

En las Figuras 15 y 16 se presenta la relación P-Q para los diferentes sistemas de manejo de suelo en los sitios 1 y 2, respectivamente, ajustados a un modelo de tipo potencial; en donde el suelo desnudo presentó el coeficiente de correlación más bajo ( $r^2 = 0.56$ ).

Los sistemas de manejo en los que se dejaron residuos de cosecha presentaron coeficientes de  $r^2$  iguales o mayores de 0.7 en los dos sitios. Para el sitio 1 fue el sistema de L0 66% el que presentó un mayor  $r^2$  (0.75); seguido de los sistemas L0 33% y L0 100% con 0.72 y 0.71, respectivamente. Este último valor es muy parecido al obtenido con el sistema de L0 100% en el sitio 2.

El sistema de LC tuvo un mejor ajuste al modelo potencial con un  $r^2$  de 0.73 en el sitio 2; mientras que, en el sitio 1 fue de 0.64. Para el sistema de manejo de LM del sitio 1 el  $r^2$  fue de 0.64 y disminuyó ligeramente (0.61) cuando se utilizó el sistema de L0 0% siempre del mismo sitio.

Si bien es cierto que existe una precisión del modelo potencial para explicar la variación de la relación P-Q, debe reconocerse que existe una alta sobreestimación y subestimación de los valores de Q a partir de P en todos los sistemas de manejo del suelo y la vegetación, lo cual coincide con lo reportado por Francisco (2005) y Medard (1994) quienes mencionan que la relación directa entre P-Q es difícil de explicar si no se establece que la información analizada es por evento de precipitación, que se conoce solo la cantidad de lluvia precipitada y no la duración, que no se toman en cuenta los contenidos de humedad del suelo al momento del evento y que no se consideran los cambios en la cobertura del suelo que es definida como la condición hidrológica de los suelos, aspectos que son importantes para definir la relación de P-Q en cualquier sitio.

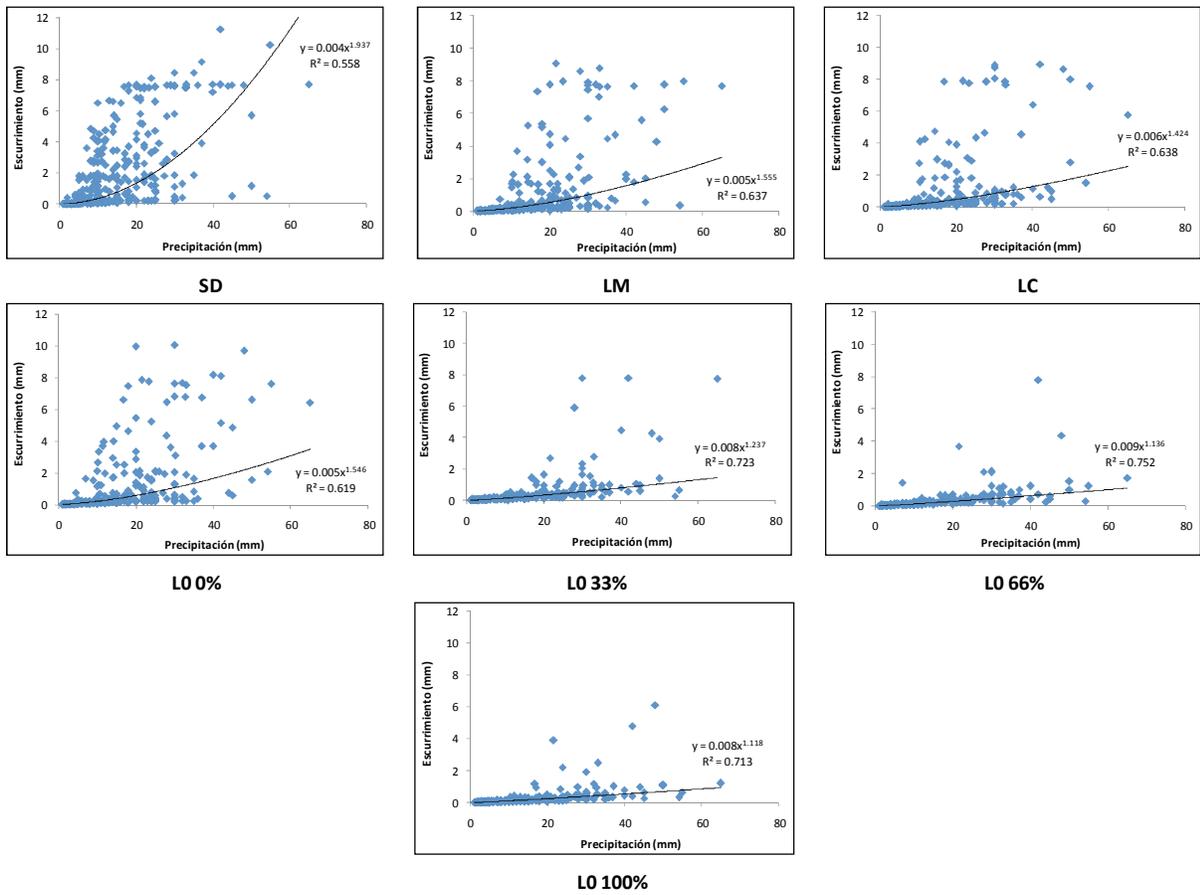


Figura 15. Relación precipitación – escurrimiento para diferentes sistemas de manejo del suelo para el sitio 1.

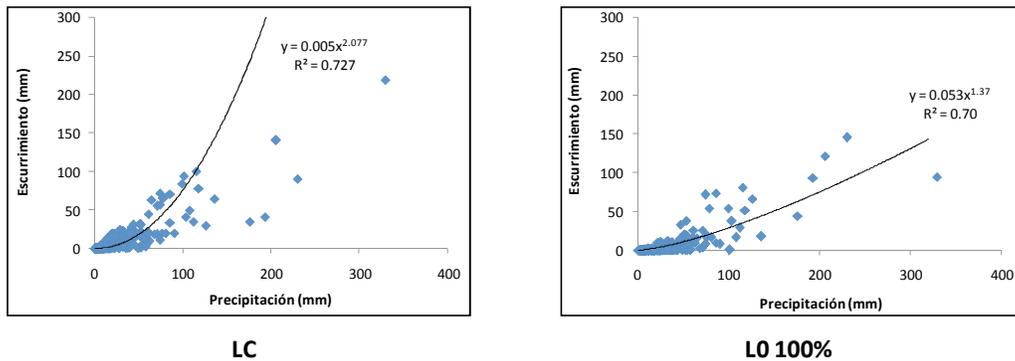
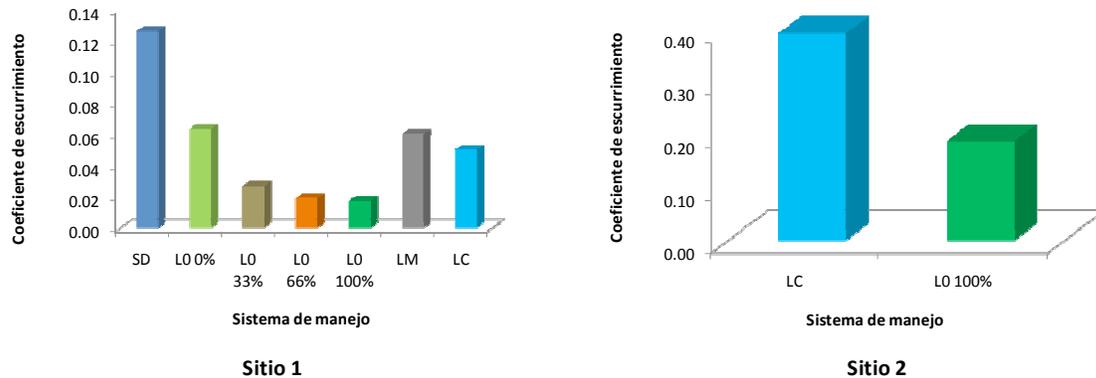


Figura 16. Relación precipitación – escurrimiento para los sistemas de manejo de suelo LC y LO 100% del sitio 2.

## 5.5 Análisis de los coeficientes de escurrimiento por sistema de manejo del suelo

### 5.5.1 Coeficiente de escurrimiento anual

El coeficiente de escurrimiento que es la relación entre Q y P muestra que a medida que el suelo se encuentra protegido con residuos de cosecha disminuye en forma potencial, presentando un comportamiento similar al de los escurrimientos, siendo muy claro en el sitio 1 y como ha sido señalado por Velázquez (2006). En contraste en el sitio 2 solo se presentan dos sistemas de manejo pero existe una tendencia decreciente a medida que se dejan residuos de cosecha en el suelo como fue observado por Francisco (2005) (Figura 17).



**Figura 17. Coeficiente de escurrimiento medio anual por sistema de manejo en los sitios de estudio.**

En el sitio 1 la eficiencia de los residuos de cosecha puede ser valorada con los cambios de C ya que pasa de 0.05 para LC a 0.017 con el uso de residuos (100%). En contraste, en el sitio 2 el coeficiente es de 0.39 con labranza convencional y se reduce a 0.19 cuando se deja la totalidad de los residuos de cosecha (Cuadro 16). Si estos coeficientes medios anuales se comparan con los valores tabulados en el Cuadro 2, de 0.55 para el sitio 1 y 0.70 para el sitio 2 en el sistema de LC, se aprecia que los coeficientes estimados son menores que los tabulados. Por lo que debe entenderse que los coeficientes reportados en este trabajo deben utilizarse a nivel

de parcela y los tabulares a nivel de cuenca como lo especifica el método racional (CP-SARH, 1991).

**Cuadro 16. Variabilidad del coeficiente de escurrimiento medio anual en los dos sitios de estudio durante el periodo 1996-2001.**

Sistema de manejo	Sitio 1			Sitio 2		
	Coeficiente de escurrimiento medio anual	Desviación estandar	CV (%)	Coeficiente de escurrimiento medio anual	Desviación estandar	CV (%)
SD	0.126	0.004	3.17			
L0 0%	0.064	0.033	51.56			
L0 33%	0.027	0.009	33.33			
L0 66%	0.019	0.009	47.37			
L0 100%	0.017	0.008	47.06	0.188	0.069	36.70
LM	0.060	0.031	51.67			
LC	0.050	0.033	66.00	0.392	0.052	13.27

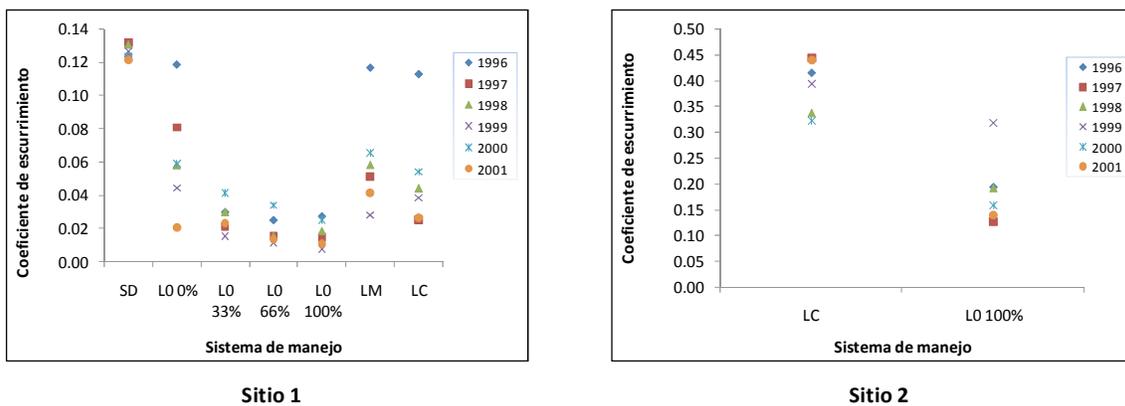
El alto coeficiente de escurrimiento obtenido con el uso de residuos (100%) en el sitio 2 ( $C = 0.188$ ) en comparación con el sitio 1 ( $C = 0.017$ ), indica que se produce 11 veces más escurrimiento en el sitio 2 en comparación con el sitio 1. Estos coeficientes de escurrimientos medios anuales obtenidos le dan pertinencia a este tipo de investigación, ya que permiten a nivel de parcela estimar la eficiencia de las prácticas de manejo del suelo para reducir los escurrimientos y valorar los servicios ambientales.

En el sitio 1, el suelo desnudo presentó un coeficiente de escurrimiento anual de 0.13; mientras que, a medida que se dejaron residuos (33, 66 y 100%), el coeficiente paso de 0.027 a 0.017, lo cual es explicado por Velásquez (2006) quien establece que dicho coeficiente decrece en función potencial hasta llegar a un valor de 0.017, lo que comprueba una alta capacidad de infiltración del agua, una reducción del flujo superficial y una baja capacidad para remover y transportar partículas de suelo en los lotes con residuos de cosecha. En este sitio se puede observar que existe poca variación en los coeficientes de escurrimiento medios anuales con los sistemas de manejo (LM y L0 0%); sin embargo, fue el sistema de LC el que reportó un coeficiente de escurrimiento bajo que puede estar asociado con la presencia de surcos perpendiculares a la pendiente y que considera el efecto de una práctica mecánica para reducir el escurrimiento y la erosión (Wishmeier y Smith, 1978).

Los coeficientes de escurrimientos anuales para el sitio 1 presentan coeficientes de variación entre 33 a 47% cuando se utilizan residuos de cosecha (33 a 100%), que son menores a

los coeficientes de variación alcanzados con los sistemas de manejo (L0 0%, LM y LC) que varían de 51 a 66%, lo cual se explica porque los lotes con residuos de cosecha presentan mayor rugosidad superficial a lo largo del ciclo de cultivo (Velásquez, 2006); mientras que, en los otros sistemas de manejo, al inicio del ciclo tienen poca protección y esta va cambiando con el desarrollo del cultivo de maíz. En el suelo desnudo el coeficiente de variación es bajo (3.17%), que es un indicador de la variabilidad anual de la precipitación y los escurrimientos (Cuadro 16).

En el sitio 1, SD mostró un menor rango de variación (0.010) entre el valor máximo y mínimo de C; mientras que, L0 0%, LM y LC presentaron el mayor rango de variación con 0.098, 0.089 y 0.088, respectivamente (Figura 18).



**Figura 18. Rango de variación del coeficiente de escurrimiento por sistema de manejo del suelo en los sitios de estudio.**

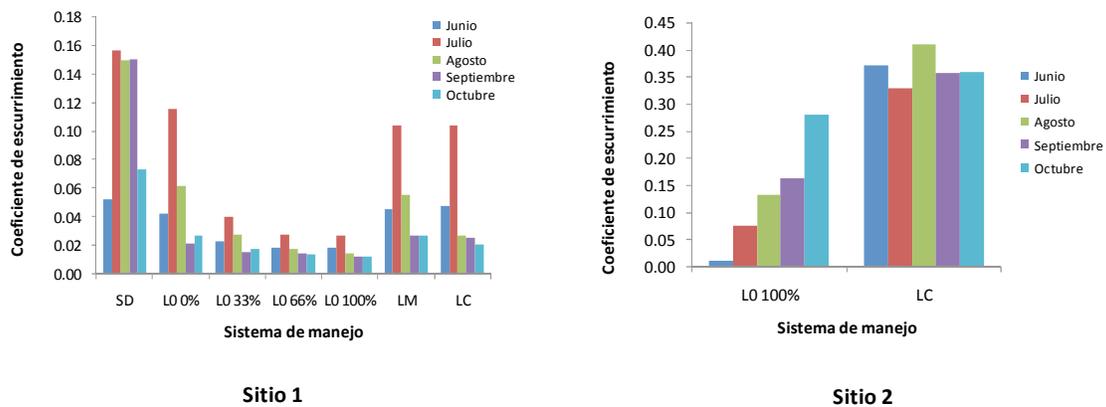
Para el sitio 2, el coeficiente de variación para el sistema LC fue 13% y se incremento hasta 36% con el sistema de L0 100%, lo cual se debe a que los suelos tienen mayor potencial de escurrimiento y grado de pendiente en comparación con el sitio 1.

De esta forma se puede definir que para los suelos del tipo A (sitio 1), los coeficientes de escurrimiento medio anual para los diferentes sistemas de manejo que se reportan en el Cuadro 16 son menores a los obtenidos para los sistemas de manejo del sitio 2, cuyos suelos corresponden al tipo C. La alta variabilidad temporal de los coeficientes de escurrimiento definida por sus coeficientes de variación hacen indispensable el análisis de la relación

precipitación escurrimiento a nivel mensual para considerar en los sistemas de manejo la variación temporal de la cobertura vegetal.

### 5.5.2 Coeficiente de escurrimiento mensual

En el mes de junio para el sitio 1, se dio el mayor valor del coeficiente de escurrimiento para todos los sistemas. Para el caso de SD, se obtuvo un coeficiente promedio de 0.157, mientras que aquellos con residuos de cosecha resultaron con una reducción considerable de este coeficiente. Se hace evidente que C durante los primeros dos meses presenta un ligero incremento, pero para el tercer mes en todos los sistemas tiende a disminuir. Esto se asocia en forma directa al desarrollo de follaje del cultivo de maíz, debido a que en los primeros dos meses el suelo se encuentra desprotegido al impacto de la lluvia, pero para el tercer mes el cultivo ha desarrollado suficiente follaje que brinda mayor protección al suelo (Figura 19). Similar comportamiento reportaron Carroll *et al.* (2000), que en suelo desnudo con 20% de pendiente obtuvieron un coeficiente de escurrimiento de 0.40 y a medida que se desarrollo la cobertura vegetal de pastos y árboles el valor de C se redujo en 75%.



**Figura 19. Coeficiente de escurrimiento medio mensual para diferentes sistemas de manejo del suelo en los dos sitios de estudio.**

En el sitio 2, también se aprecia el efecto de los residuos de cosecha en la reducción de C; sin embargo, no se da como en el sitio 1 una tendencia en la reducción del coeficiente, por el contrario en L0 100% este se incrementa durante todo el ciclo del cultivo mientras que en LC el valor es muy parecido para todos los meses ya que su rango de variación se da entre 0.33 y 0.41. Existe una alta variabilidad en cuanto al valor del coeficiente de escurrimiento a escala mensual entre los sitios. El sistema de L0 100% del sitio 2 tiene un coeficiente de variación mayor que el sistema del sitio 1, que es lo esperado, debido a que la precipitación mensual se incrementa durante el ciclo de desarrollo del cultivo y aumentan los escurrimientos superficiales en la región de Vistahermosa, Ver. (Anexo 4).

### 5.5.3 Variación del coeficiente de escurrimiento respecto al desarrollo de follaje del cultivo

Para explicar la variación del coeficiente de escurrimiento en el ciclo de desarrollo del cultivo, se relacionaron los valores de C con el porcentaje de cobertura del suelo, generado con modelos para estimar el crecimiento del maíz en ambos sitios.

El modelo tipo logístico utilizado para el sitio 1 fue propuesto por Santos (1995), el cual a partir de los días de desarrollo del cultivo se puede predecir el porcentaje de cobertura de follaje que a continuación se describe:

$$y = \frac{80.47}{1+103.207e^{-0.0577x}} \quad (38)$$

Donde:

$y =$  cobertura del follaje (%)

$x =$  días de desarrollo del cultivo

Para el sitio 2 se utilizaron los valores de cobertura del follaje del maíz reportados por Francisco (2005), cuyos datos para los 5 meses del ciclo de cultivo para el año 2002 fueron 31, 91, 91, 93 y 98% respectivamente. Con estos datos se obtuvo el modelo logístico siguiente:

$$y = \frac{93.066}{1+47.168e^{-0.1149x}} \quad (39)$$

Donde:

$y =$  cobertura del follaje del maíz (%)

$x =$  días de desarrollo del cultivo

El desarrollo de follaje del maíz reviste gran importancia debido a que en los primeros estadios del cultivo, este no brinda protección suficiente al suelo de la lluvia. Prueba de ello es que en el sitio 1, en los sistemas de manejo (LC, LM y L0 0%) los valores de C se incrementan hasta el segundo mes, luego tienden a disminuir debido a la cobertura del suelo por el maíz, que es mayor de 50%, a excepción del suelo desnudo que no tiene vegetación y por consiguiente presenta los valores más altos de C (Cuadro 17). En los sistemas donde se utilizaron residuos de cosecha los valores de C son más bajos en relación con los otros sistemas de manejo y se aprecia que C tiende a disminuir debido al efecto asociado de la cobertura del maíz y de residuos, debido a que se incrementa la rugosidad del suelo, lo que disminuye el escurrimiento superficial en 77% respecto al observado sobre superficies lisas, esto según lo reportado por Johnson *et al.* (1979).

**Cuadro 17. Coeficiente de escurrimiento medio mensual en base a desarrollo y cobertura del follaje del cultivo de maíz en el sitio 1.**

Sistema de manejo	Mes de desarrollo del cultivo y cobertura del follaje				
	1 (4.2)*	2 (19)	3 (51.1)	4 (73.1)	5 (79)
SD	0.05	0.16	0.15	0.15	0.07
L0 0%	0.04	0.12	0.06	0.02	0.03
L0 33%	0.02	0.04	0.03	0.02	0.02
L0 66%	0.02	0.03	0.02	0.01	0.01
L0 100%	0.02	0.03	0.01	0.01	0.01
LM	0.04	0.10	0.06	0.03	0.03
LC	0.05	0.10	0.03	0.03	0.02

\*El número fuera de paréntesis se refiere al mes del cultivo y el número entre paréntesis indica el porcentaje de cobertura del follaje.

En el sitio 2, el coeficiente de escurrimiento para el sistema de LC muestra un valor (0.37) ligeramente mayor el primer mes, disminuyendo en el segundo mes y alcanza su valor máximo al tercer mes a pesar de incrementarse la cobertura vegetal, y después empieza a disminuir como era de esperarse (Cuadro 18). Esta variación del valor de C en el sistema de

labranza convencional no se explica del todo por la presencia de la cobertura vegetal sino que está fuertemente asociada con los volúmenes de precipitación. En contraste, en el sistema de L0 100% la cobertura de residuos reduce el valor de C el primer mes, pero este aumenta con el tiempo a pesar de que la cobertura vegetal se incrementó a más del 89%, lo que confirma que a pesar de la protección del suelo por la cobertura vegetal y la presencia de los residuos de cosecha, fueron los volúmenes precipitados mayores que la capacidad de infiltración del agua en el suelo, lo que generó más escurrimientos pero a velocidades no erosivas y con menor capacidad de remoción y transporte de las partículas del suelo como fue reportado por Francisco (2005).

**Cuadro 18. Coeficiente de escurrimiento medio mensual en base a desarrollo y cobertura del follaje del cultivo de maíz en el sitio 2.**

Sistema de manejo	Mes de desarrollo del cultivo y cobertura del follaje				
	1 (37.2)	2 (89)	3 (93)	4 (93.1)	5 (93.1)
L0 100%	0.01	0.07	0.13	0.16	0.28
LC	0.37	0.33	0.41	0.36	0.36

Esta información permite sugerir que a pesar de las altas precipitaciones, la presencia de residuos es una práctica agronómica que reduce los escurrimientos y aunque el valor de C llega a ser ligeramente menor al del sistema de LC en el último mes, la presencia de la cubierta vegetal es factor clave para reducir el flujo superficial y capacidad erosiva durante todo el periodo de crecimiento del cultivo.

#### **5.5.4 Coeficiente de escurrimiento por evento**

La alta variabilidad de la precipitación, su asociación con la cubierta vegetal y con los contenidos de humedad previos a un evento son los factores que explican los altos coeficientes de variación (mayores de 99%) del coeficiente de escurrimiento en todos los sistemas de manejo del suelo, como se muestra en el Cuadro 19. Para los diferentes sistemas de manejo y los dos sitios se registraron valores mínimos de C entre 0.001 y 0.002, la diferencia se dio con los valores de C máximos y medios por evento.

Para el sitio 1, SD presentó el valor medio de C más alto (0.103) y el máximo valor (0.651), en relación al resto de los sistemas. En los sistemas de manejo (LC, LM y L0 0%) los valores medios y máximos de C fueron muy parecidos y menores que los observados en el sistema SD, lo cual se explica por la protección de la vegetación y los métodos de siembra; sin embargo, presentan altos coeficientes de variación que indican un comportamiento aleatorio parecido al de la precipitación y modificado por la presencia del cultivo en sus diferentes etapas de crecimiento. La variabilidad del valor de C disminuye con los sistemas de manejo que utilizan residuos de cosecha (33, 66 y 100%), así como los valores medios y máximos de C, que se justifica por el aumento de rugosidad en la superficie como fue señalado previamente.

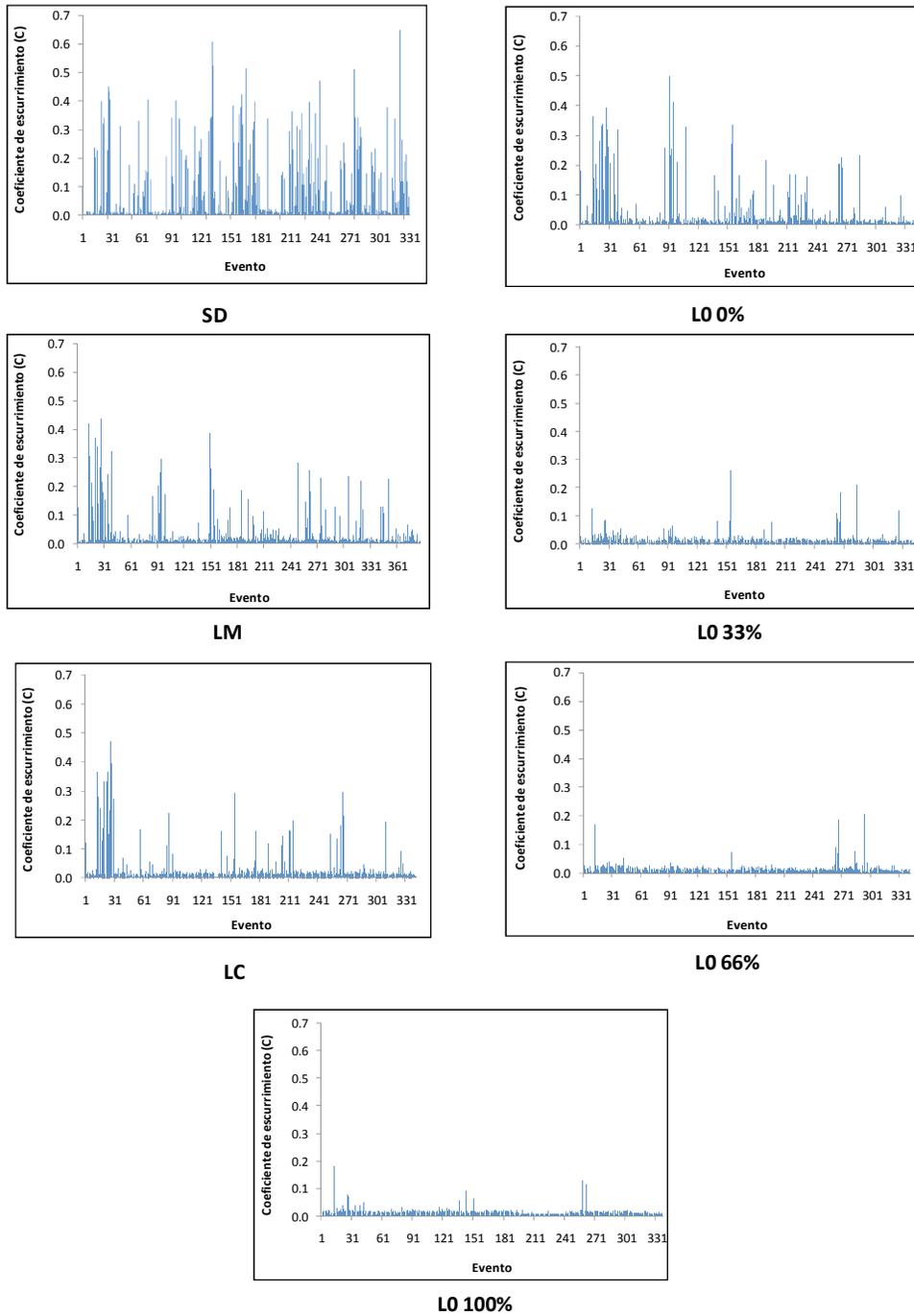
**Cuadro 19. Variación del coeficiente de escurrimiento por evento para los sitios de estudio.**

Variable	Sitio 1						Sitio 2		
	SD	L0 0%	L0 33%	L0 66%	L0 100%	LM	LC	L0 100%	LC
C min (mm)	0.001	0.001	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
C max (mm)	0.651	0.497	0.261	0.204	0.180	0.440	0.471	0.957	0.972
C med (mm)	0.103	0.044	0.020	0.016	0.015	0.040	0.036	0.071	0.243
Desv. estándar (mm)	0.132	0.078	0.025	0.019	0.016	0.072	0.067	0.154	0.242
CV	127.77	177.90	124.40	117.70	104.15	180.61	185.00	216.57	99.70

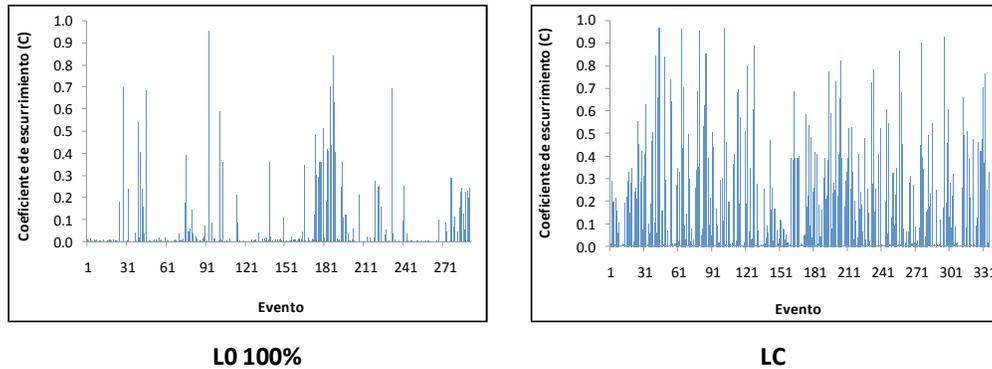
En el sitio 2 fue el sistema de LC el que presentó la menor variación de los valores de C, con un valor medio de 0.243, un máximo de 0.972 y un coeficiente de variación de 99%, en contraste con el sistema de L0 100% en donde no varió mucho el valor máximo de C y si decreció el valor medio de éste hasta 0.071 por la presencia de residuos, sin embargo, se aumentó el coeficiente de variación ya que a pesar de los residuos, en algunos eventos los volúmenes escurridos son similares a los observados en LC a pesar de la cobertura, no así su capacidad erosiva.

Al comparar los sistemas de LC se observó en el sitio 1 un valor medio de C muy bajo (0.036) en comparación con el valor medio de C de 0.243 obtenido para el sitio 2, siendo superior 6.75 veces este último al observado en el sitio 1; mientras que, el valor máximo de C es solo dos veces mayor en el sitio 2 en comparación con el sitio 1. En el sistema de L0 100%, en el sitio 1 existe menor coeficiente de variación del valor de C en comparación del sitio 2 y el valor medio de C del sitio 1 es 4.7 veces menor al sitio 2. Lo que sugiere que la diferencia entre los

tipos de suelo, la pendiente y la precipitación de ambos sitios explica los cambios en el valor de C a nivel diario. Es importante señalar que el método racional utiliza coeficientes medios anuales para la estimación de escurrimientos, sin embargo, no es adecuado para obtener escurrimientos medios a otra escala, por lo que el análisis de C a diferentes escalas temporales brinda nuevas opciones que resultan de mucha utilidad para estimar escurrimientos mensuales y por evento, sin dejar de reconocer la alta variabilidad de los coeficientes de escurrimiento que están asociados con la relación de P-Q (Figuras 20 y 21).



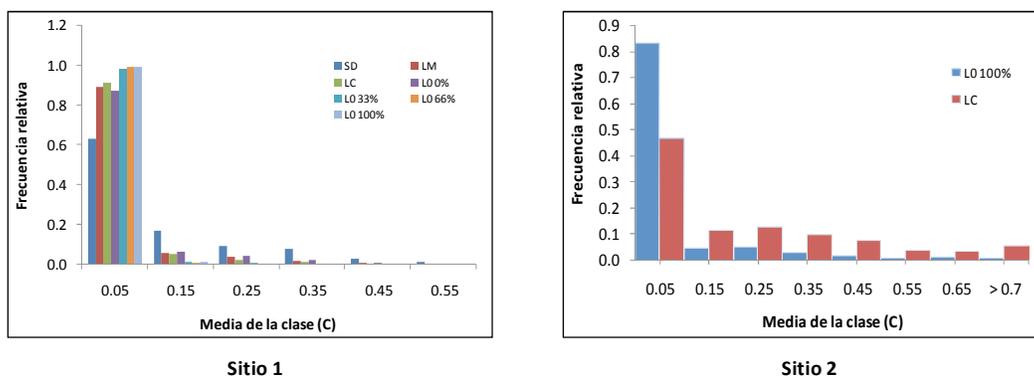
**Figura 20. Comportamiento del coeficiente de escurrimiento por sistema de manejo del suelo para el sitio 1.**



**Figura 21. Comportamiento del coeficiente de escurrimiento por evento para el sitio 2.**

Respecto a la frecuencia relativa de los coeficientes de escurrimiento para el sitio 1 y según se aprecia en la Figura 24, arriba del 80% de los coeficientes se encontraron dentro del rango 0.01 a 0.1 para LM, LC y L0 0%; mientras que, para SD fue 63% y este es el único sistema que presentó valores por encima de 0.5 pero en un porcentaje muy bajo, de apenas 1.3% de los eventos. En los sistemas que incluyeron la los residuos de cosecha (L0 33%, L0 66% y L0 100%), se encontró una mayor concentración de valores de C en el rango de 0.01 a 0.1 (arriba del 98%).

Para el sitio 2, el sistema de LC presenta 46% de los valores de este coeficiente entre 0.01 y 0.1, mientras que, para L0 100% fue de 83%. Ambos presentan valores de C superiores a 0.7, pero en porcentajes muy bajos; de 5 y 1% para LC y L0 100%, respectivamente (Figura 22).



**Figura 22. Frecuencia relativa del coeficiente de escurrimiento en los sitios de estudio.**

## 5.6 Análisis de Curvas Numéricas por sistema de manejo del suelo

En esta sección se analizan los valores temporales de las curvas numéricas en los distintos sistemas de manejo del suelo y vegetación, a través de los métodos de P-Q y método de pares ordenados.

### 5.6.1 Curvas numéricas estimadas mediante el método de P-Q

Con el método P-Q y utilizando la ecuación 12 se determinó el valor de S y posteriormente con la ecuación 21 se calcularon los valores de las curvas numéricas promedio para la CHA II utilizando los radios de abstracción inicial de 0.2 y 0.05. Los valores encontrados se utilizaron para calcular las curvas numéricas para las CHA I y III de acuerdo con las ecuaciones 24 y 25, respectivamente, para los diferentes sistemas de manejo y para los dos sitios de trabajo y los cuales se presentan en el Cuadro 20.

**Cuadro 20. Curvas numéricas estimadas y proyectadas para diferentes condiciones de humedad antecedente, sistema de manejo y sitio de estudio.**

Sistema de manejo	Sitio 1						Sitio 2					
	$\lambda^x = 0.05$			$\lambda = 0.20$			$\lambda = 0.05$			$\lambda = 0.20$		
	I <sup>y</sup>	II <sup>z</sup>	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
SD	60	78	90	79	90	96						
LM	52	72	87	74	87	95						
LC	51	71	86	74	87	95	66	82	92	79	90	96
L0 0%	52	72	87	74	87	95						
L0 33%	49	69	85	72	86	94						
L0 66%	48	68	84	72	86	94						
L0 100%	47	67	84	71	85	94	36	57	77	60	78	90

<sup>x</sup> = radio de abstracción inicial, <sup>y</sup> = condición de humedad antecedente seca (I), media (II) y húmeda (III), <sup>z</sup> = para esta condición el valor de CN fue el observado, para las otras condiciones el valor se estimó con las ecuaciones 24 y 25.

El valor de la curva numérica para la condición de humedad antecedente II en el lote de SD fue de 90, considerando una abstracción inicial de 0.2S. Este valor es parecido al valor de CN de 87 para suelo desnudo bajo la misma condición de humedad, determinado para un suelo de textura arcillosa, como fue reportado por Flores (2004) en el municipio de Tepatitlán, Jalisco en el año 2002 en un lote de 50 m<sup>2</sup>. Si se considera una abstracción inicial de 0.05S, entonces el

valor de CN para la CHA II bajo a 78, presentándose una reducción de 12 unidades de curva numérica.

Para el sistema de LC, es notoria la diferencia que existe entre los valores de CN para los dos sitios, dependiendo de las abstracciones iniciales (0.2S y 0.05S) utilizadas. En el sistema de LC para la CHA II y  $\lambda = 0.05$  el valor de CN para el sitio 1 fue de 71; mientras que, en el sitio 2 se obtuvo un valor de 82; para  $\lambda = 0.2$  los valores obtenidos para esta condición de humedad fueron de 87 y 90 para los sitios 1 y 2, respectivamente. Para este sistema de labranza, Flores (2004) reportó valores de CN de 84 para CHA II y Tapia *et al.* (2000) reportaron un valor de CN de 93.

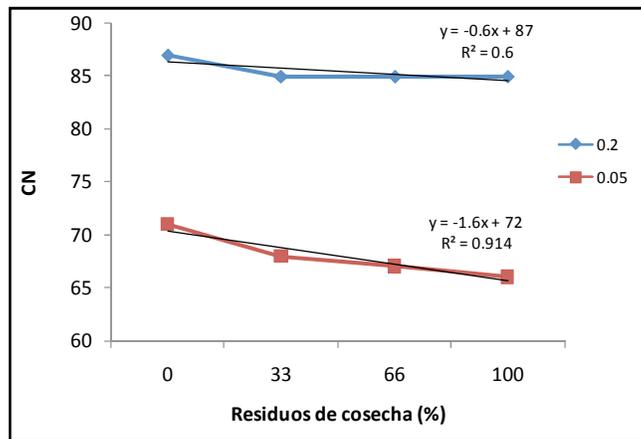
En el sitio 1 con residuos de cosecha, se observa que a medida que se incrementa el porcentaje de residuos, se presenta una reducción en el valor de CN para las tres CHA y para los dos valores de las abstracciones iniciales empleadas. Sin embargo, resulta más sensible la utilización de  $\lambda = 0.05$  ya que brinda mayor diferencia del valor de CN entre los sistemas; en cambio, los valores de CN no variaron cuando se empleo un radio de abstracción de 0.20.

Esta sensibilidad igualmente se hace notoria en las tres condiciones de humedad para todos los sistemas de manejo y en especial para la CHA III en el sitio 1, en donde se presenta un rango de variación de apenas dos unidades de CN entre el valor máximo (SD) y el valor mínimo (L0 100%) con el radio de abstracción de 0.20, mientras que esta diferencia se hace mayor (seis unidades) al emplear el valor de 0.05.

En el sitio 1, los sistemas de producción (LC, LM y L0 0%) presentan una ligera reducción en los valores de CN con ambos valores de abstracciones iniciales que indican el efecto del manejo del suelo y la vegetación para reducir el potencial de escurrimiento y aumentar la infiltración del agua y es notorio que los valores de CN con el radio de abstracción inicial de 0.2 fueron mayores que los reportados cuando se utilizó  $\lambda = 0.05$ .

El uso de residuos de cosecha muestran una tendencia a reducir el potencial de escurrimiento con comportamiento lineal ya que indica que a medida que aumentan los residuos de cosecha hay una reducción en las curvas numéricas y donde se presenta un mejor ajuste del

modelo lineal para el radio de abstracción de 0.05 ya que presentó un  $r^2$  de 0.91, en comparación con  $r^2$  igual a 0.6 para  $\lambda$  igual a 0.2 (Figura 23).



**Figura 23. Valor de CN respecto a la incorporación de residuos de cosecha en el sistema de manejo de labranza cero para los radios de abstracción 0.05 y 0.20 para el sitio 1.**

Respecto al sitio 2, se muestra en el Cuadro 20 que el tratamiento de LC presentó los valores más altos de CN en comparación con L0 100% para las tres condiciones de humedad, de lo que se infiere la eficiencia de los residuos de cosecha para disminuir la escorrentía.

Como se mencionó anteriormente, al comparar el tratamiento de LC para ambos sitios, los valores de CN fueron mayores en el sitio 2; pero para el sistema de L0 100% resultó lo contrario, presentándose los valores más altos en el sitio 1. No resulta del todo claro que ocurre en este sistema para que los valores de CN sean inferiores en el sitio 2, si se toma en cuenta que se tiene una precipitación superior en este sitio, además de un grado de pendiente mayor (14.5%) en comparación con 10% de pendiente del sitio 1. Posiblemente esto puede atribuirse a que la cantidad y distribución de los residuos de cosecha del sitio 2 presentan mayor eficiencia para el control de los escurrimientos.

Los valores de CN obtenidos con  $\lambda = 0.05$  no pudieron ser comparados debido a que los datos obtenidos en investigaciones anteriores fueron generados con la utilización del valor de 0.20, por lo que se debe realizar la transformación de los valores tabulados de  $CN_{0.20}$  a  $CN_{0.05}$

mediante el uso de la fórmula 20. Sin embargo, es notorio que el menor valor de las abstracciones iniciales brinda un mejor ajuste de CN en cuanto a la incorporación de residuos de cosecha y mayor variabilidad entre los sistemas.

Las curvas numéricas encontradas pueden ser utilizados para valorar los servicios ambientales de las prácticas de conservación de suelo y agua a nivel de parcelas de productores, por lo que esta información experimental de lotes de escurrimiento debería integrarse a nivel nacional para obtener tablas con valores de CN a nivel local para diferentes condiciones de suelo y manejo de los cultivos y así modificar los valores actuales de  $CN_{II}$  que se utilizan a nivel de cuencas y parcelas.

### 5.6.1.1 Variabilidad de CN

El uso de valores promedio de CN son los mejores estimadores del escurrimiento diario como lo establecen (Schneider y McCuen, 2005); sin embargo, no deja de reconocerse que existe una gran variabilidad de los valores de CN estimados en los lotes de escurrimientos y que se explican por el grado de desarrollo del cultivo, los sistemas de manejo del suelo, los contenidos de humedad en el suelo al momento de las tormentas y la cantidad e intensidad de la lluvia. Debido a estos factores se encontró una alta variabilidad de los valores de las curvas numéricas como se muestra en el Cuadro 21.

**Cuadro 21. Variabilidad de CN por sistema de manejo del suelo para los sitios 1 y 2 con  $\lambda = 0.05$ .**

Variable	Sitio 1							Sitio 2	
	SD	L0 0%	L0 33%	L0 66%	L0 100%	LM	LC	L0 100%	LC
n	331	342	342	341	342	342	342	330	335
CN mínimo	27	34	24	24	25	25	33	14	33
CN máximo	98	96	96	96	97	96	97	99	99
CN medio	76	70	67	66	65	70	69	61	82
Desv. estándar	14.12	14.29	14.29	15.15	15.15	13.91	14.27	17	12.53
CV (%)	18.58	20.41	21.33	22.96	23.32	19.88	20.68	28.19	15.28

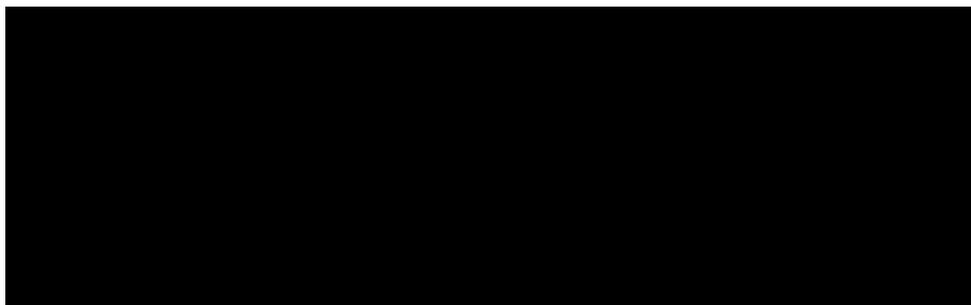
Se obtuvo una alta variación en los valores de CN en todos los sistemas de manejo, destacándose el parámetro de  $CN_2$  con  $\lambda = 0.05$  ya que, los valores mínimos y máximos fueron muy parecidos en los dos sitios y abarcan toda la gama de variación del valor de CN, situación

que era de esperarse por la alta variabilidad de la precipitación y el escurrimiento a nivel diario, porque la estimación con mayor precisión a escala diaria no se puede alcanzar sino se agrupan los valores de P-Q para diferentes condiciones de humedad y para diferentes etapas del ciclo de desarrollo del cultivo para hacer de  $CN_{II}$  un valor más dinámico y variable en el tiempo.

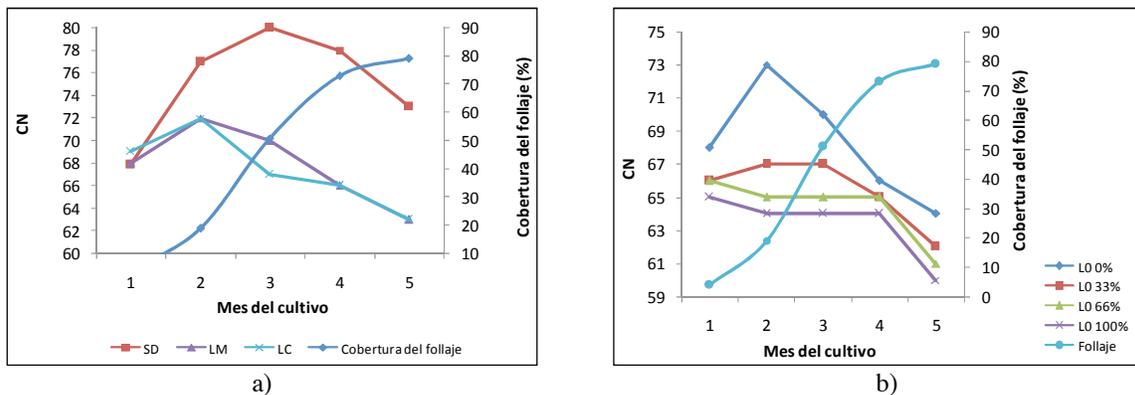
### 5.6.1.2 Curvas numéricas asociadas con la cobertura vegetal

Cuando no existe vegetación, como es el caso de suelo desnudo del sitio 1, era de esperarse un valor de CN casi uniforme; sin embargo, esta varía con la precipitación en cada uno de los meses analizados (Figura 24.a). Para el sitio 1, con los sistemas de laboreo (LC, LM y L0 0%) se aprecia cómo se desarrolla la cobertura del follaje del cultivo a lo largo de su ciclo (4, 19, 51, 73 y 79%) mediante el modelo logístico utilizado (Cuadro 22 y Figuras 24.a y 24.b). En todos los casos se muestra un ligero incremento de CN en los dos primeros meses, quizá como producto de la primera etapa de desarrollo y en los meses posteriores el valor de CN tiende a bajar, lo cual indica que las condiciones hidrológicas de los suelos son regulares y buenas (cuando la cobertura es mayor a 50 y 75%, respectivamente) y se aumenta la capacidad de infiltración de agua en el suelo.

**Cuadro 22. Valores promedios mensuales de CN asociadas con cobertura vegetal para el sitio 1.**



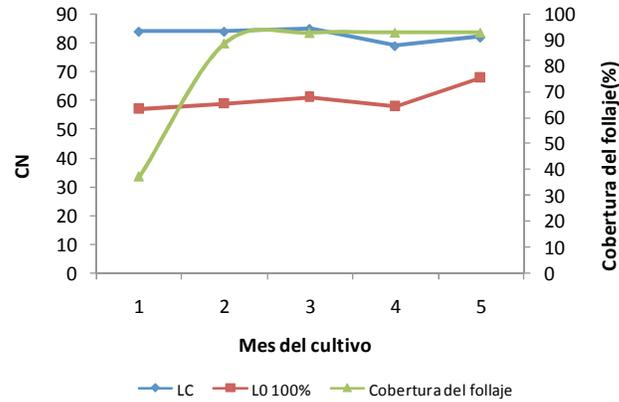
\* El número fuera del paréntesis indica el mes del cultivo, mientras que el número entre paréntesis indica la cobertura del follaje del cultivo del maíz en porcentaje



**Figura 24. Comportamiento de CN promedio mensual. a) Asociadas con la cobertura del follaje b) Asociada con la cobertura del follaje y residuos de cosecha.**

En los sistemas de labranza con residuos del sitio 1, se aprecia que los valores de CN en las primeras etapas del cultivo son similares y es notorio que a medida que aumenta el porcentaje de residuos el valor CN disminuye, lo cual a pesar de la alta variabilidad de las relaciones de P-Q en promedio si hay cambio en este parámetro. Durante los primeros tres meses, que corresponden al efecto asociado de la cobertura del cultivo y de los residuos, estos permanecen más o menos uniformes y no es sino hasta el cuarto mes cuando los valores de CN disminuyen, lo cual se explica porque con la energía de la lluvia y la presencia de los escurrimientos los residuos de cosecha se integran al suelo, además que la precipitación para el último mes se reduce (Figura 24.b).

El sistema de manejo del suelo de LC para el sitio 2 presentó el valor medio mensual más alto de todos los sistemas (83) incluyendo al sitio 1, mientras que LO 100% mostró un valor medio de 61 (inclusive más bajo que el observado en el sitio 1) y las curvas numéricas se mantuvieron más o menos constantes (Figura 25). El modelo de crecimiento para el sitio 2 presentó un comportamiento diferente al observado en el sitio 1, lo que se debe, entre otras cosas a la densidad de siembra y tipo de variedad utilizada.



**Figura 25. Comportamiento de CN promedio mensual en el sitio 2.**

### **5.6.1.3 Curvas numéricas asociadas a los contenidos de humedad del suelo y condición de humedad antecedente**

En este apartado se presentan los valores de CN para las condiciones seca, media y húmeda de acuerdo con el criterio de considerar la precipitación acumulada cinco días previos antes de un evento.

En el Cuadro 23 se presentan los valores mínimos, medios y máximos para las tres condiciones de humedad antecedente, en los dos sitios de estudio. En todos los sistemas de manejo se observa un amplio rango de variación en los valores de CN, debido a que este parámetro se encuentra estrechamente relacionado con factores como la precipitación, condición hidrológica del suelo, uso de suelo y la condición de humedad antecedente, todos ellos dinámicos y cambiantes en el tiempo. En el sitio 1, todos los sistemas presentaron un valor ascendente de la CHA I a la CHA II, como es de esperarse; sin embargo, al pasar de la condición de humedad media a la húmeda, no se da este mismo comportamiento, por el contrario se da una reducción e incluso valores de CHA III resultan menores a los de la condición seca. Caso distinto al emplear las ecuaciones 24 y 25, ya que con ellas se garantiza obtener valores ascendentes de la condición seca a la húmeda. El suelo desnudo presentó los valores más altos de CN para las tres CHA, debido a que este tiene una condición hidrológica mala a través del tiempo de evaluación (cobertura del suelo menor 50%). El resto de los sistemas presentan valores inferiores de CN en

comparación con SD ya que los escurrimientos se ven atenuados por el desarrollo del follaje del cultivo y por el uso de residuos de cosecha.

Al dejar los residuos en el suelo se observa una reducción en una unidad de CN para los sistemas de L0 33%, L0 66% y L0 100% en las tres CHA, lo que indica la eficiencia de esta práctica para reducir los escurrimientos superficiales. Al comparar el sistema de LC, en el sitio 2 se presentaron valores más altos de CN; para tal caso, se tuvo un valor de 82 para la CHA II; mientras que, en el sitio 1 fue de 71, lo que denota un menor potencial de escurrimiento de los suelos del tipo A del sitio 1.

**Cuadro 23. Valores de CN para las tres condiciones de humedad antecedente para diferentes sistemas de manejo del suelo en los dos sitios de estudio.**

<sup>y</sup> = condición de humedad seca (I), media (II) y húmeda (III), <sup>z</sup> = el valor fuera del paréntesis es el valor medio de CN, mientras que los valores entre paréntesis corresponden al valor mínimo y máximo de CN, respectivamente

Existe una gran diferencia en cuanto a los valores estimados de CN a partir de las ecuaciones 24 y 25 para las CHA I y III, respectivamente (Cuadro 20) y las obtenidas mediante la ecuación 21 (Cuadro 23). Los valores teóricos obtenidos de CN, si bien es cierto resultan lógicos, debido a que para una CHA III corresponde un valor mayor de CN, que indica mayor escurrimiento debido a la cantidad de lluvia acumulada cinco días previos y sin embargo, al compararlas con los valores del Cuadro 23, cuyo valor medio es el que se espera brinde mayor eficiencia, se presentan valores distintos, lo que trae la incertidumbre de cuál de los factores para la determinación de CN influyen en mayor grado para que se presenten estas disimilitudes. Por esta razón, se empleó el balance hídrico para LC de ambos sitios durante el año de 1996 para poder apreciar en forma gráfica cómo influyen los factores de precipitación, condición

hidrológica del suelo, grupo de suelo y contenido de humedad del suelo en los coeficientes de escurrimiento y curvas numéricas.

### 5.6.2 Método pares ordenados

Este método consistió en calcular el valor de curvas numéricas a través de modelos generados con datos de precipitación y escurrimiento en los distintos sistemas de manejo, donde estos valores de CN obtenidos se aproximaron a un valor constante cuando se incrementó la precipitación. Se consideraron los datos de precipitación y escurrimiento del período de 1996-2001, ordenándose ambos pares de datos de mayor a menor y luego se determinó el valor correspondiente de CN como se mencionó previamente en el punto 2.8.2 por medio de la ecuación 22. La constante ajustada  $-k_1$  se determinó por el método de mínimos cuadrados; haciendo uso de logaritmos para expresar la ecuación en un modelo de tipo lineal ( $y = a + bx$ ), quedando de la siguiente manera:

$$\ln(CN - CN_{\infty}) = \ln(100 - CN_{\infty}) - k_1 P \quad (39)$$

Posteriormente con el uso de Excel, en el eje de las ordenadas se graficaron los valores de  $\ln(CN - CN_{\infty})$  y en el eje de las abscisas los valores de precipitación. Enseguida se ajustaron los datos a un modelo de tipo lineal, siendo el valor de la pendiente de la recta la constante ajustada ( $-k_1$ ).

En el sitio 1, con excepción del sistema de suelo desnudo, debido a que no se pudo determinar un modelo del tipo exponencial que se ajustara a los valores de P y CN, se aprecia que a medida que se aumentó la cantidad de residuos de cosecha, los valores de curvas numéricas presentaron una reducción, aproximándose a valores asintóticos que variaron desde 60 para L0 0% hasta 39.1 en L0 100% (Figura 26). Esto indica una alta variabilidad temporal de los valores encontrados de CN, estrechamente relacionado con la precipitación, tipo de suelo y vegetación. En el caso de suelo desnudo, fue posible determinar un valor de CN promedio calculando la precipitación media (13.2 mm), luego para esta precipitación se obtuvo el valor de Q que resulta de los pares ordenados y posterior a ellos se utilizaron las ecuaciones 12 y 21 para

obtener el valor de la curva numérica que fue de 77, muy parecido al valor medio obtenido a través del método de P-Q (76). Esto presenta gran importancia debido a que si no se pueden generar modelos a través de este método, se pueden obtener valores de CN con la precipitación media, que se relaciona en gran medida con el valor obtenido por medio del método de P-Q. En cuanto a los sistemas de LM, LC y L0 0%, si bien es cierto presentaron un comportamiento estándar, para las precipitaciones entre 20 mm y 40 mm, se dio un comportamiento ascendente o violento, que puede deberse según lo reportado por Hawkins (1993), a datos extremos para algunas láminas críticas de lluvia, pero de igual manera tienden a un valor constante.

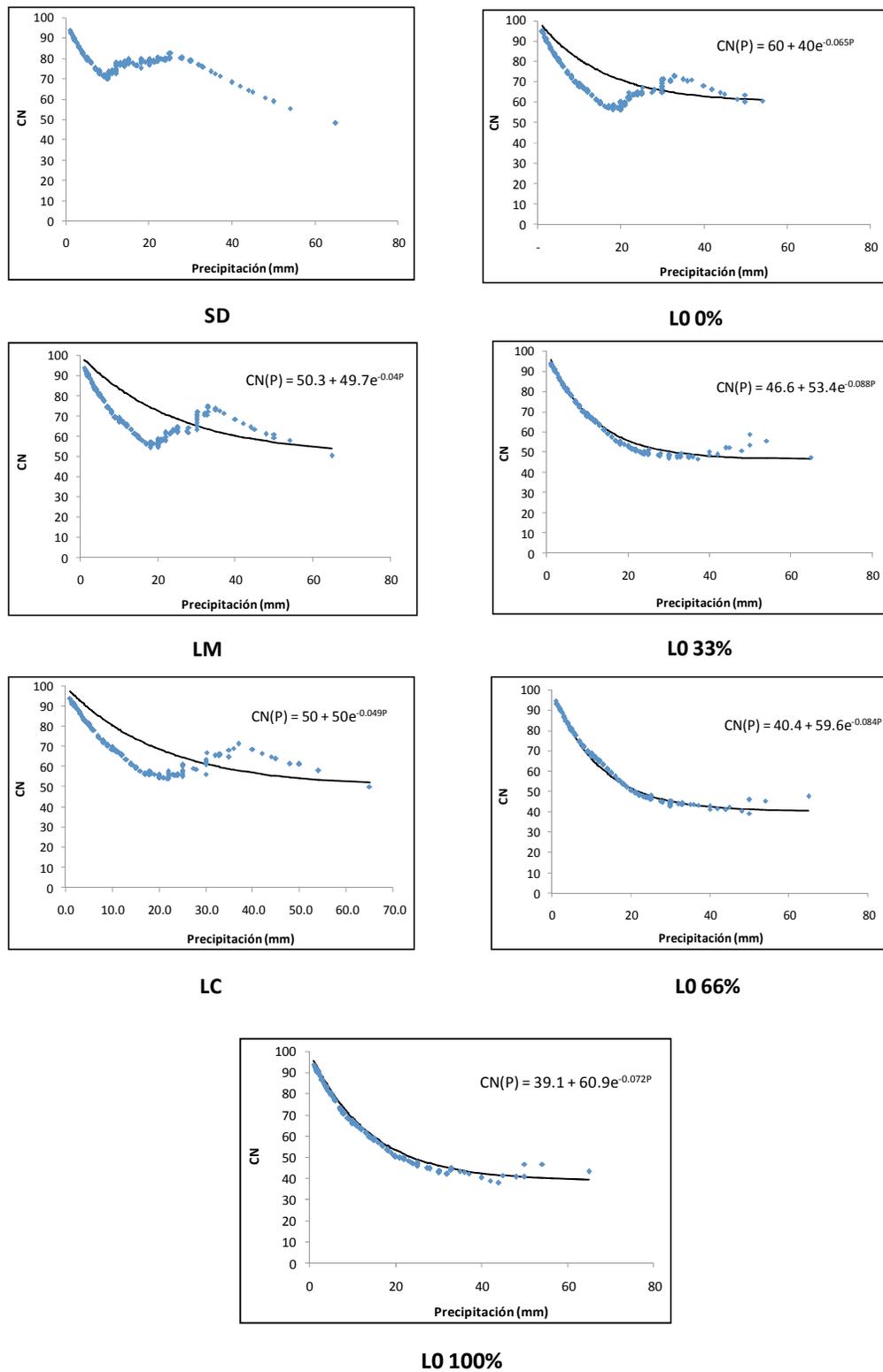
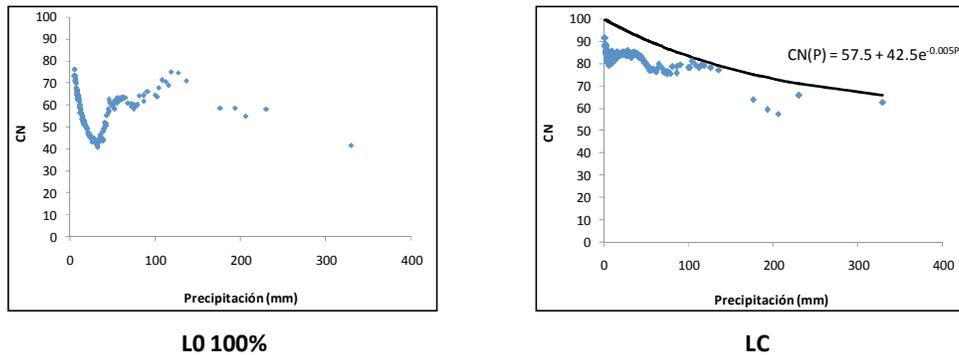


Figura 26. Comportamiento de CN a través del método de pares ordenados para el sitio 1.

En el sitio 2 y para los valores de CN observados, el sistema de manejo L0 100% presentó comportamientos estándar para precipitaciones inferiores a 30 mm, arriba de este valor, se presenta un comportamiento violento, inclusive con una mayor variación a los observados en el sitio 1, por lo que resulta difícil al igual que en suelo desnudo, establecer una ecuación que explique de manera fehaciente el comportamiento temporal de CN respecto a la cantidad de lluvia. Al realizar el mismo procedimiento empleado en suelo desnudo para encontrar el valor medio de CN, se obtuvo un valor de 44 para este sistema de L0 100%, que difiere del valor medio de 61 encontrado por el método de P-Q, hecho que se explica por el comportamiento violento como se observa en la Figura 27. En el caso de LC, se presentó un comportamiento estándar, especialmente para precipitaciones inferiores a los 140 mm.



**Figura 27. Comportamiento de CN a través del método de pares ordenados para el sitio 2.**

El uso de este método para determinar los valores asintóticos a los que tiende CN por sistema de manejo de suelo cuando se incrementa la precipitación reviste gran importancia, debido a que en muchas regiones de la República Mexicana no se tienen registros continuos de los escurrimientos superficiales a nivel de subcuencas por el alto costo que representa esta actividad; por lo que con bases de datos de P y Q generadas años atrás es posible estimar el valor al que tienden las curvas numéricas ya que para cada período de retorno de lluvia se tiene un valor específico de CN, lo que hace de este método una herramienta de mucha utilidad para la planeación y valoración de obras de excedencia de conservación de suelo y del agua.

## 5.7 Bondad de ajuste entre los escurrimientos observados y estimados

Mediante el empleo de la ecuación 27, se encontraron los coeficientes de determinación para el sitio 1. El uso de la abstracción inicial de 0.05S brindó un mejor ajuste del modelo, debido a que los valores del coeficiente para todos los sistemas fueron superiores a los observados con la abstracción de 0.2S. A medida que se aumentó la cantidad de residuos de cosecha, se observó un mejor ajuste del modelo, tal como se aprecia en el Cuadro 24, en donde el sistema de L0 100% presentó la mayor eficiencia de predicción (0.22 y 0.13) para las abstracciones iniciales de 0.05S y 0.2S, respectivamente. Por otra parte, LC, LM y L0 0% son los sistemas que presentaron el menor ajuste entre los escurrimientos observados y estimados, debido a que sus coeficientes de determinación fueron de 0.17 con  $\lambda = 0.05$ .

**Cuadro 24. Coeficiente de determinación ( $R^2$ ) para diferentes sistemas de manejo del suelo mediante el método de curvas numéricas P-Q en el sitio 1.**

Sistema de manejo del suelo	Abstracción inicial	
	0.05S	0.2S
SD	0.20	0.13
L0 0%	0.17	0.11
L0 33%	0.18	0.10
L0 66%	0.20	0.12
L0 100%	0.22	0.13
LM	0.17	0.11
LC	0.17	0.10

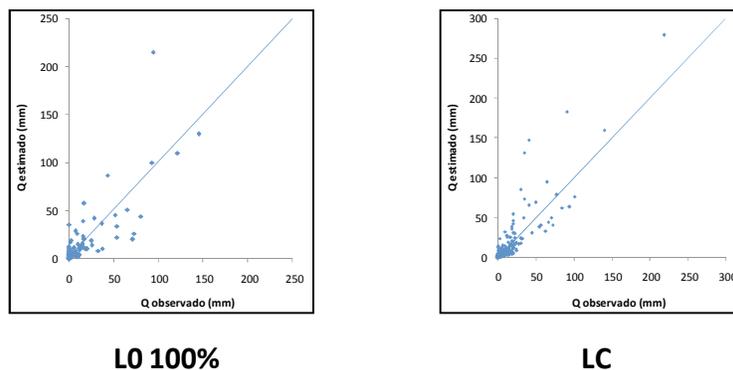
En este sitio se aprecia una moderada bondad de ajuste en todos los sistemas de manejo evaluados, como ha sido reportado por Davis (2000) y Neter *et al.* (1985). Esto indica que es posible predecir con cierta confiabilidad los escurrimientos a partir de las curvas numéricas, sin embargo, no deja de reconocerse que existen problemas con los contenidos de humedad del suelo, la cobertura vegetal y la cantidad e intensidad de la precipitación que hace difícil obtener un mejor ajuste como ha sido señalado por Hussein (1995), Torres-Benites *et al.* (2005), entre otros.

En el sitio 2 a pesar de que existe una mayor variación de la lluvia, se presentó un mejor ajuste del modelo que es considerado de moderado a fuerte (Davis, 2000 y Neter *et al.*, 1985) y es superior al obtenido en los sistemas de manejo analizados en el sitio 1 (Cuadro 25). Estos ajustes fueron mejores considerando ambas abstracciones iniciales y se aprecia claramente que el uso del valor de 0.05S mejora ligeramente la bondad del ajuste como ocurrió en el sitio 1.

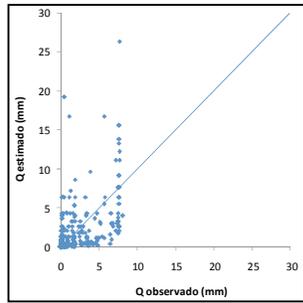
**Cuadro 25. Coeficiente de determinación ( $R^2$ ) para los sistemas de manejo del suelo en el sitio 2 mediante el método P-Q de curvas numéricas.**

Sistema de manejo del suelo	Abstracción inicial	
	0.05S	0.2S
LC	0.62	0.57
LO 100%	0.66	0.42

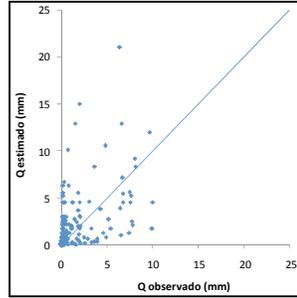
Debe señalarse que en este sitio se utilizó el modelo utilizado por Francisco (2005) ya que permitió obtener los valores de  $R^2$  más consistentes dentro de la escala de variación de cero a uno. Cuando se utilizó la ecuación 1 se encontraron valores de  $R^2$  menores a 0.02, lo cual no es congruente con lo analizado en forma gráfica (Figura 28) ya que no es posible que se obtengan menores valores de  $R^2$  si se comparan con los del sitio 1, en donde por el método gráfico se aprecia una alta sobreestimación, especialmente en los sistemas con residuos de cosecha (Figura 29).



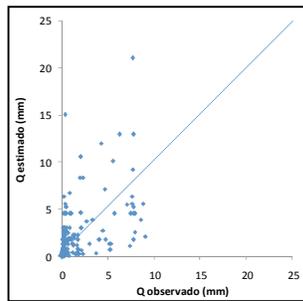
**Figura 28. Esguerrimiento observado y esguerrimiento estimado para los sistemas de manejo LO 100% y LC por medio del método de curvas numéricas de P-Q con abstracción inicial de 0.05S en el sitio 2.**



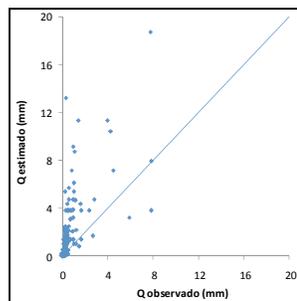
**SD**



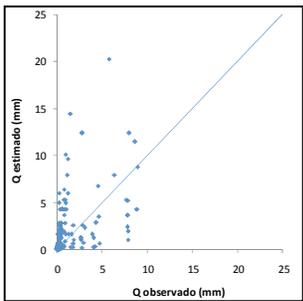
**LO 0%**



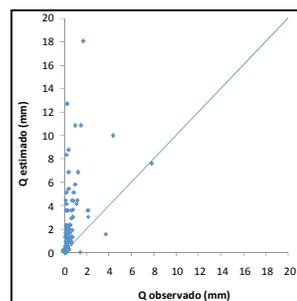
**LM**



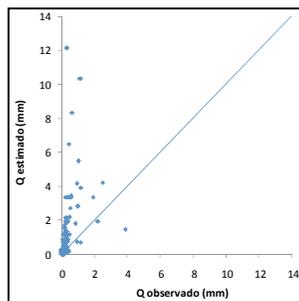
**LO 33%**



**LC**



**LO 66%**



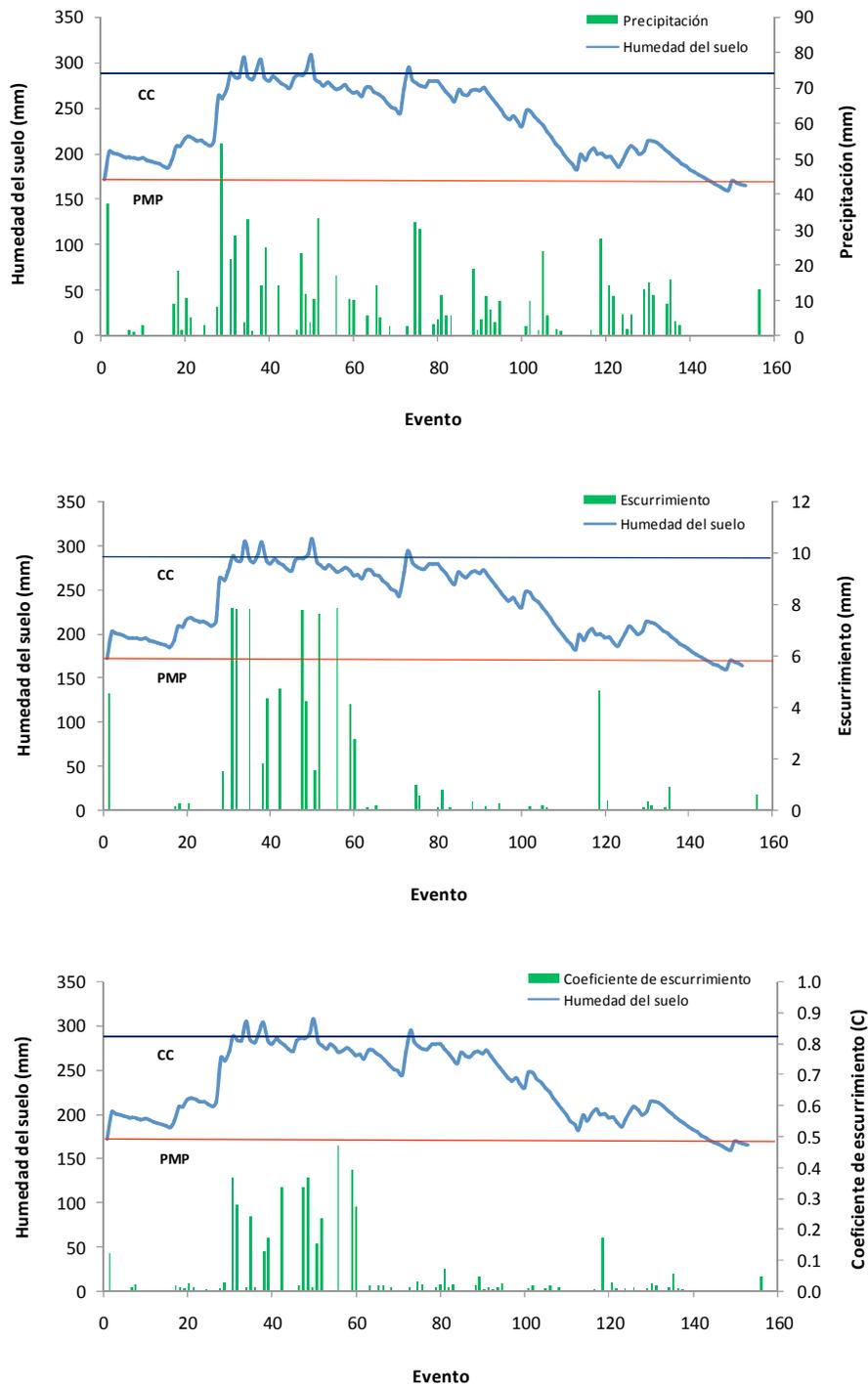
**LO 100%**

**Figura 29.** Esguerrimiento observado y esguerrimiento estimado para diferentes sistemas de manejo del suelo por medio del método de curvas numéricas de P-Q con abstracción inicial de 0.05S en el sitio 1.

## 5.8 Balance hídrico

Para el sistema de manejo de LC del sitio 1, se tiene las constantes de humedad del suelo de 171.7 mm para PMP y 286.7 mm para CC con una profundidad de perfil de 75 cm. Los meses más lluviosos para este año correspondieron a julio con 247 mm y junio y agosto con 174 mm cada uno. Los mayores escurrimientos como coeficientes de escurrimientos, coinciden con el mes más lluvioso, aunado a que el suelo se encuentra a capacidad de campo, lo que influye en que se presente menor infiltración de agua en el suelo y aparezcan los flujos superficiales. Si se asocian los escurrimientos con la cobertura del follaje del cultivo, se tiene que para el segundo mes el cultivo desarrollo apenas 19% de cobertura del follaje, lo que favorece los escurrimientos superficiales. Para el tercer mes (agosto), los escurrimientos fueron menores a pesar de que el suelo se encontraba muy cercano a capacidad de campo; sin embargo, para este período el cultivo ya había desarrollado 51% de cobertura del suelo, lo que mitigó el impacto de las gotas de lluvia, aumentándose la infiltración, motivo por el cual los escurrimientos y los coeficientes se vieron reducidos considerablemente (Figura 30).

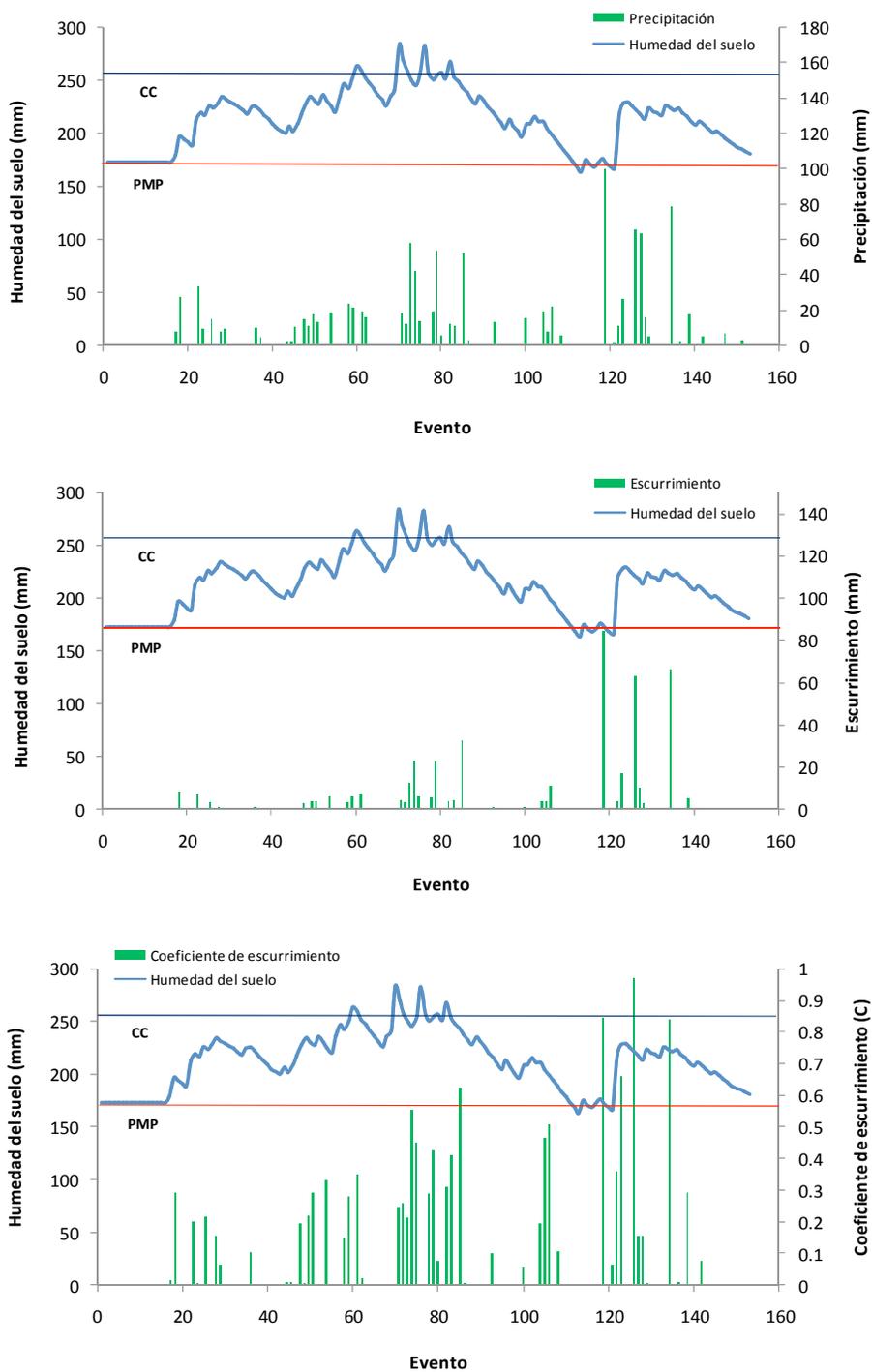
Respecto al comportamiento de las curvas numéricas, se presenta una tendencia similar al coeficiente de escurrimiento, siendo julio el mes con un mayor valor de CN (87) y le sigue el mes de septiembre con CN igual a 78, valor que se puede asociar a la cantidad de humedad del suelo y a la precipitación registrada, excluyéndose la cobertura del follaje ya que esta era de 73%. De esto se observa claramente cómo el escurrimiento superficial se encuentra estrechamente relacionado con factores como la precipitación, contenido de humedad del suelo, la cobertura y manejo del suelo, resultando difícil establecer cuál de ellos es el agente atenuante o acelerador para que se presenten los escurrimientos superficiales.



**Figura 30. Balance hídrico del sistema de LC del sitio 1 para los meses de junio a octubre (año de 1996).**

Respecto al sitio 2, los meses de agosto y septiembre fueron los más lluviosos con 314 y 338 mm, respectivamente; sin embargo, se observa que los mayores escurrimientos como coeficientes de escurrimiento se presentaron en octubre, debiéndose esto a que a finales de septiembre y específicamente durante los últimos cinco días se precipitaron 154 mm, lo que se traduce en un aumento del contenido de humedad del suelo en los primeros días de octubre aunado a esto los 100 mm de lluvia acumulada durante la primer semana de octubre.

En cuanto a los valores de CN, septiembre y agosto presentaron las curvas más altas para este sistema con 88 y 86, respectivamente y dentro de los factores que inciden en los escurrimientos, se puede asociar los altos valores de CN al efecto de la lluvia sobre el contenido de humedad del suelo ya que se alcanza la CC y percolación durante el mes de agosto y para el mes de septiembre básicamente se asocia el valor de CN a la cantidad de lluvia debido a que esta supera la capacidad de infiltración de estos suelos, que como se ha venido mencionando, pertenecen a suelos del tipo C, que presentan un bajo potencial de infiltración (Figura 31). En el Anexo 5 se presenta el balance hídrico de los demás sistemas de manejo de suelo para ambos sitios.



**Figura 31. Balance hídrico del sistema de LC del sitio 2 para los meses de junio a octubre (año de 1996).**

## VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1 Conclusiones

1. Los sistemas de manejo del suelo con el uso de residuos de cosecha, modifican las propiedades hidrológicas del suelo e incrementan los contenidos de materia orgánica en mayor proporción en relación con los sistemas de labranza convencional.
2. La precipitación de la región de Vistahermosa, Veracruz presentó mayor variabilidad temporal en comparación a la observada en la localidad de Ajuno, Michoacán, durante el período de 1996-2001, lo que indica su mayor capacidad para generar escurrimientos en los sistemas de labranza de conservación (L0 100%) y labranza convencional.
3. El efecto de la cobertura del follaje del cultivo de maíz en los sistemas de manejo del suelo sin residuos fue importante ya que redujo los escurrimientos superficiales en ambos sitios.
4. Los coeficientes de escurrimiento anuales estimados explican el impacto de los sistemas de manejo del suelo evaluados en ambos sitios para reducir los escurrimientos superficiales; sin embargo, se encontró que estos coeficientes deben ser valorados a nivel mensual para reducir la variabilidad temporal del flujo superficial y asociarlo con la cobertura vegetal del cultivo.
5. La utilización de la abstracción inicial de 0.05S en el método de curvas numéricas brindo un mejor ajuste en comparación con el valor de 0.2S, ya que se confirmó que en pequeñas parcelas se mejora la capacidad predictiva de los escurrimientos.
6. Se empleo el método de pares ordenados como metodología para explicar el comportamiento decreciente de las curvas numéricas en función de la precipitación, encontrando que en el sitio 1, con el uso de residuos de cosecha se logra un comportamiento estándar y que con los sistemas de manejo sin residuos presentan un comportamiento violento con precipitaciones comprendidas entre 20 mm y 40 mm,

producto de precipitación extremas con altos periodos de retorno. Esto se vuelve más crítico en el sitio 2.

7. El método de pares ordenados permite inferir que a partir de datos de precipitación se pueden seleccionar valores de CN que pueden ser utilizados para estimar los escurrimientos superficiales y mejorar la bondad de ajuste del método de curvas numéricas asumiendo similares periodos de retorno entre la lluvia y los escurrimientos.

## **6.2 Recomendaciones**

1. Continuar con el análisis del comportamiento multitemporal y espacial del coeficiente de escurrimiento y curvas numéricas para diferentes cultivos, utilizando la información de los estudios realizados sobre estimación de escurrimiento en el país.
2. Difundir los datos de coeficientes de escurrimiento y de curvas numéricas para diferentes sistemas de manejo obtenidos en este trabajo, para que puedan ser empleados en los modelos de predicción de variables hidrológicas en el país.
3. Asociar las mediciones de escurrimientos con el uso de variables dinámicas como son los contenidos de humedad del suelo y cobertura vegetal mediante el uso de sensores remotos, para entender la variabilidad espacial y temporal de las relaciones precipitación-escurrimiento.

## VII. LITERATURA CITADA

- Arnaez, J., T. Lasanta, P. Ruiz-Flaño and L. Ortigosa. 2007. Factors affecting runoff and erosion under simulated rainfall in Mediterranean vineyards. *Soil and Tillage Research* 93:324-334.
- 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.
- Arnold, J. G. and J. R. Williams. 1994. SWRRB a watershed scale model for soil and water resources management. USDA, Agricultural Research Service, Temple, Texas.
- 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.
- Boughton, W. C. 1989. A review of the USDA SCS Curve Number Method. *Aust. J. Soil Res.* 27:511-523.
- Bouyoucus, G. J. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soil. *Agron. Jour.* 54:464-465.
- Carroll, C., L. Merton and P. Burger. 2000. Impact of vegetative cover and slope on runoff, erosion and water quality for field plots on a range of soil and spoil materials on Central Queensland coal mines. *Aust. J. Soil Res.* 38:313-327.
- Castro, N., A. Auzet, P. Chevallier and J. Leprun. 1999. Land use change effects on runoff and erosion from plot to catchment scale on the basaltic plateau of Southern Brazil. *Hydrological Processes* 13:1621-1628.
- Cerdan, O., Le Bissonnais, Y., G. Govers, V. Lecomte, Oost, K. van., A. Couturier, C. King and N. Dubreuil. 2004. Scale effect on runoff from experimental plots to catchments in agricultural areas in Normandy. *Journal of Hydrology* 299:4-14.
- Chapa, J. R. 1987. Dinámica del sistema estructural de un Andosol mólico del Estado de Michoacán bajo tres sistemas de laboreo. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. 227 p.
- Chaplot, V., Le Bissonnais, Y. 2000. Field measurements of interrill erosion under different slopes and plot sizes. *Earth Surface Processes and Landforms* 25:145-153.

- Chapra, C. S. y P. R. Canale. 1987. Métodos numéricos con aplicación en computadoras personales. Anya. Ed. McGraw-Hill. México. 641 p.
- Chow, V. T., D. R. Maidment and L. W. Mays. 1988. Applied hydrology. McGraw-Hill. New York. 498 pp.
- CP-SARH, 1991. Manual de conservación del suelo y del agua. Capítulo de escurrimientos superficiales. Ed. Colegio de Postgraduados, México.
- Dardanelli, J. L. and R. Gil. 1997. Eficiencia del uso de agua en el sistema de producción. In: Seminario de siembra directa. INTA. Buenos Aires, octubre 1997. 43-46 9.
- Davis, B. 2000. Introduction to agricultural statistics. Delmar, Albany. N. Y. USA
- Descroix, L., D. Viramontes, M. Vauclin, J. L., González Barrios and M. Esteves. 2001. Influence of soil surface features and vegetation on runoff and erosion in the western Sierra Madre (Durango, Northwest Mexico). *Catena* 42(2):115-135.
- Díaz, C., V. M. Esteller y F. López-Vera. 2006. Hidrología superficial. p. 1-154. In: C. Díaz, V. M. Esteller y F. López-Vera (ed.) Recursos hídricos: Conceptos básicos y estudios de caso en Iberoamérica. 2 ed. Montevideo, Uruguay.
- Duchaufour, P. 1977. Pedology: pedogenesis and classification. Edit. George Allen & Unwin, London.
- Elsenberg, H. 2001. Hydrologic flowpaths in tropical rain forest soilscapes: A review. *Hydrological Processes* 15:1751-1759.
- FAO. 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56.
- Flores L., H. E. 1994. Análisis agroclimático del noreste de Jalisco, México, para el manejo en la producción de maíz (*Zea mays*) de temporal. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. 155 p.
- Flores L., H. E. 2004. Rutas de transporte superficial de Nitrógeno y Fósforo en un área de drenaje de Jalisco, México. Tesis de Doctorado. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. 155 p.
- Fox, D. M., R. B. Bryan and A. G. Price. 1997. The influence of slope angle on final infiltration rate for interrill conditions. *Geoderm* 80:181-194.

- Francisco N., N. 2005. Productividad y erosión hídrica en tres sistemas de manejo del cultivo doble de maíz en una ladera del trópico subhúmedo de México. Tesis de Doctorado. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. 122 p.
- García, E. 1973. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México. 2da ed.
- Gresillon, J. M. 1994. Contribution a l'étude de la formation des écoulements de crue sur les petits bassins versants. Approches numériques et expérimentales a différentes échelles. Laboratoire des Transferts en Hydrologie et en Environnement, Joseph Fourier University, Grenoble, Francia.
- Haan, C. T., and R. E. Shultze. 1986. Return period flow prediction with uncertain parameters. American Society of Agricultural Engineers Paper 86-2520. 13 pp.
- Hawkins, R. H. 1978. Runoff numbers with varying site moisture. Am. Soc. Civ. Eng. J. Irr. Drain Div. 104:389-398.
- Hawkins, R. H. 1984. A comparison of predicted and observed runoff Curve Numbers, Proceedings of Special Conference Irrigation and Drainage Division, Flagstaff Arizona, ASCE, New York, NY.
- Hawkins, R. H. 1993. Asymptotic determination of runoff Curve Numbers from data. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 119:334-345.
- Hawkins, R. H., D. E. Woodward and R. Jiang. 2002. Investigations of the runoff Curve Number abstraction ratio. Proc., USDA-NRCS Hydraulic Engineering Workshop.
- Hayes, D. C. and R. L. Young. 2006. Comparison of peak discharge and runoff characteristics estimates from the Rational Method to field observations for small basins in Central Virginia. Scientific Investigations Report 2005-5254. U. S. Department of the Interior, U. S. Geological Survey.
- Hernández B., E. 2005. Estimación del escurrimiento en una ladera de alta pendiente reforestada con *Pinus tenuifolia*, usando el método del Número de la Curva. Revista Forestal Venezolana 49(1):49-59.
- Hjelmfelt, A. T., D. A. Woodward, G. Conaway, A. Plummer, Q. D. Quan, J. Van Mullen, R. H. Hawkins and P. D. Rietz. 2001. Curve Numbers, recent developments. Proceedings of the Congress-International Association for Hydraulic Research Conf 29 A:285-291.

- Hong, Y., R. F. Adler, F. Hossain, S. Curtis. 2006. Estimate gridded and time-variant runoff curve numbers using satellite remote sensing and geospatial data. *Water Resources Research*, in press.
- Hudson, N. 1995. Soil conservation. BT Batsford Limited: London.
- Hussein, M. 1996. An analysis of rainfall, runoff and erosion in the low rainfall zone of northern Iraq. *Journal of Hydrology* 181:105-126.
- IBSNAT. 1985. IBSNAT Progress Report (1 september 1982 to 31 july 1985). Department of Agronomy and Soil Science College of Tropical Agriculture and Human Resources. University of Hawaii at Manoa Honolulu, Hawaii. 48 p.
- Idowu, O. J., R. J. Rickson and R. J. Godwin. 2001. Erosion as affected by tillage-induced roughness and surface mulch in a soil with a simulated subsurface pan. *Transactions of the ASAE* 45(1):83-87.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 1987. Carta estatal de suelos Veracruz. Escala 1:1 000 000. INEGI, México.
- Infante G., S. y G. Zárate. 1990. Métodos estadísticos: un enfoque interdisciplinario. 2<sup>a</sup>. ed. Editorial Trillas, México. 643 p.
- Izhizuka, Y. and C. A. Black. 1980. Suelos derivados de cenizas volcánicas en Japón. Traducción CIMMYT. México, D. F.
- Joel, A., I. Messing, O. Seguel and M. Casanova. 2002. Measurement of surface water runoff from plots of two different sizes. *Hydrological Processes* 16:1467-1478.
- Johnson, C. B., J. V. Mannering and W. C. Mondelhauer. 1979. Influence of surface roughness and clod size and stability on soil and water losses. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 43: 772-777.
- Julien, P. Y. and G. E. Moglen. 1990. Similarity and length scale for spatial varied overland flow. *Water Resources Research* 26(8):1819-1832.
- Kirby, M. J. 2001. From plot to continent: Reconciling fine and coarse scale erosion models. In: Scott, D. E., R. H. Mohtar, G. C. Steinhardt (eds.). *Sustaining the Global Farm, Selected papers from the 10<sup>th</sup> International Soil Conservation Organization meeting held May 24-29, 1999 at Purdue University and the USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory.* pp. 860-870

- Lal, R. 1991. Tillage and agricultural sustainability: Introduction. *Soil and Tillage Research* 20:133-146.
- Lamont, S. J. 2006. Curve Number dependence on basin hydrologic variables governing runoff. Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in Civil and Environmental Engineering. Morgantown, West Virginia. 95 pp.
- Legates, D. R. and G. J. McCabe. 1999. "Evaluating the use of "Godness of fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation". *Water Resources Research* 35:233-241.
- López-Sabater, C. J., K. G. Renard and V. L. Lopez. 2002. Neural-Network-Based algorithms of hydraulic roughness for overland flow. *Transactions of the ASAE* 45(3):661-667.
- López M., R. 2006. Caracterización de la sequia y aplicación del modelo EPIC en el cultivo de maíz para el estado de Veracruz. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. 136 p.
- Macías D., R. 1992. Influencia de diferentes sistemas de labranza y coberturas del suelo sobre el control de la escorrentía, la erosión y el rendimiento de forraje del maíz. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. 133 p.
- Maeda, T., H. Takenaka and B. P. Warkentin. 1977. Physical properties on alophane soils. *Adv. Agron.* 29:229-264
- Mah M., G. C., L. A. Douglas and A. J. Rigrose-Voase. 1992. Effect of crust development and surface slope on erosion by rainfall. *Soil Sciences* 154:37-43.
- Maldonado de L., O. A. 1998. El modelo SWRRB en la planeación del recurso hídrico de la cuenca Itzapa, departamento de Chimaltenango, Guatemala. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. 270 p.
- McCuen, R. H. 2003. Modeling hydrologic change. CRC Press. Boca Raton, Fla.
- McCuen, R. H. 2004. Hydrologic Analysis and Desing. Prentice Hall, Upper Saddle, New Jersey, 07458, 3 (ed)
- McCutcheon, S. C. 2006. Testimony to the West Virginia forest management review commission. Hydrology of Eastern U. S. Forested Mountain Watersheds: Rigorous testing of the Curve Number Method for flood analysis.

- Medard, A. J. 1994. Evaluación de la producción de sedimentos y del escurrimiento superficial en pequeñas cuencas agrícolas. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. 135 p.
- Medina O., L. E. 2006. Pérdidas de suelo, agua y nutrimentos en parcelas experimentales con sistemas agrícolas de año y vez y alternativos en un Acrisol de Michoacán. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. 92 p.
- Milly, C. D and P. Eagleson. 1987. Effects of spatial variability on annual average water balance. *Water Resources Research* 23(11):2135-2143
- Mitchell, J. K., B. A. Engel, R. Srinivasan, R. L. Bingner and S. S. Wang. 1993. Validation of AGNPS for small mild topography watersheds using an integrated AGNPS/GIS. pp 503-510. *In Advances in Hydro-Science and Engineering*. Vol. 1, ed. S. S. Y. Wang. University, MS: Center for Computational Hydroscience and Engineering.
- Morgan R., P. C., J. N. Quinton, R. E. Smith, G. Govers, W. A. Poesen, K. Auerswald, G. Chisci, D. Torri, M. E. Styczen and J. V. Folly. 1998. The European Soil Erosion Model (EUROSEM): Documentation and user guide. Silsoe. College, Cranfield University, UK
- Musgrave, G. W. 1955. How much of the rain enters the soil? *Water Yearbook of Agriculture*. U. S. Department of Agriculture, Washington, D. C. pp. 151-159.
- Neild, R. E., M. W. Seeley and N. H. Richman. 1977. The computation of agricultural oriented normals from monthly climatic summaries. *Agric. Meteorol.* 19:181-187.
- Neild, R. E. 1982. CLIGEN: A computer program that generates daily agroclimatic parameters from simple climatic data. INTSORMIL. Project report UN 8. University of Nebraska. Lincoln, NE, U.S.A.
- Neild, R. E. and J. Logan. 1984. AGCLIM: A computer program to determine growing seasons and to evaluate the phenological response of grain sorghum and other grain crops. INTSORMIL. Project report UN 8. University of Nebraska. Lincoln, NE, USA.
- Neitsch, S. L., J. G. Arnold, J. R. Kiniry and J. R. Williams. 2005. Soil and Water Assessment Tool, Theoretical Documentation, version 2005. Grassland, Soil and Water Research Laboratory, ARS.
- Neter, J., W. Wasserman, and M. Kutner. 1985. *Applied linear statistical models: regression, analysis of variance and experimental designs*. 2<sup>nd</sup> Ed. Irwin, Homewwod, IL. USA

- Oropeza M., J. L. 1977. Cálculo aproximado para la determinación de la intensidad máxima de la lluvia. Tesis profesional. Escuela Nacional de Agricultura. Departamento de irrigación, Chapingo, México.
- Overton, D. E., and M. E. Meadows. 1976. Stormwater Modeling. Academic, N. Y. USA.
- Palacios V., O. L. 1986. El uso de modelos en irrigación y áreas afines. Terra 4: 41-49.
- Pape, Th. and D. Legger. 1994. Manual for soil description and classification. Department of Soil Science and Geology. Wageningen Agric. Univ. Wageningen. The Netherlands. 69-86 p.
- Poesen, J. 1984. The influence of slope angle on infiltration rate and hortonian overland flow Volume. Zeitschriftfür Geomorphologie 49:117-131.
- Ponce, V. M. and R. H. Hawkins. 1996. Runoff Curve Number: Has it reached maturity? Journal of Hydrologic Engineering 1(1):11-19
- Porta C., J., M. López-Acevedo R. y C. Roquero de Laburu. 2003. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. 3ª ed. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España.
- Ramírez C., M. y J. L. Oropeza-Mota. 2001. Eficiencia de dos prácticas productivo-conservacionistas para controlar erosión de laderas en el trópico. Agrociencia 35:489-495.
- Rawls, W. J., D. L. Brakensiek y B. Sony. 1983. Agricultural management of soil water properties, part I: soil water retention and Grenn-Ampt infiltration parameters, Trans., ASAE 26(6):1752-1753.
- Salas P., G. 1977. Recursos no renovables. *In*: Recursos naturales de la cuenca del Papaloapan. Instituto Mexicano de Recursos Naturales Renovables. México. 221-250 p.
- Santos L., E. 1995. Cuantificación de la erosión hídrica bajo diferentes coberturas vegetales en un Andosol de Pátzcuaro, Michoacán. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo.
- Schneider, L. E. and R. H. McCuen. 2005. Statistical guidelines for Curve Number generation. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 131(3):282-290
- Schomaker, C. E. 1966. The effect of forest and pasture on the disposition of precipitation. Marine Farm Research, July.
- Sharman, K., H. Singh and O. Pareek. 1983. Rain water infiltration into a bare loamy sand. Hydrological Sciences Journal 28:417-424

- Sharpley, A. N. and J. R. Williams (eds). 1990. EPIC. Erosion/Productivity Impact Calculator: 1. Model documentation. U. S. Department of Agriculture. Technical bulletin. No. 1768.
- 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.
- Sivapalan, M. and J. D. Kalma. 1995. Scale problems in hydrology: Contributions of the Robertson Workshop. *Hydrol. Process.* 9:243-250
- Smith, R. E., and J. R. Williams. 1980. Simulation of the surface water hydrology. In "CREAMS". (Ed. W. G. Knisel) Ch. 2. USDA Conservation Res. Rep. No. 26.
- Sobhani, G. 1976. A review of possible watershed designs methods for possible adoption to Iranian conditions. M. Sc Thesis. Utah State Univ., Logan, Utah.
- Tapia V, L. M. 1999. Escurrimiento y producción de sedimentos en sistemas de manejo agrícola en la cuenca del Lago de Pátzcuaro. Tesis de Doctorado. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. 168 p.
- Tapia-Vargas, M., M. Tiscareño L., J. L. Oropeza M., J.J. Stone and M. Velásquez V. 2000. Runoff and sediment yields simulation under five soil management practices. *Agrociencia* 34:663-675
- Tebrügge, F. and A. Böhrnsen. 1997. Crop yields and economics aspects of no-tillage compared to plough tillage: Results of long term soil tillage field experiments in Germany. In: Tebrügge, F. and A. Böhrnsen (eds). Experiences with the application of no-tillage crop production in the West European countries. Proceedings of the EC-workshop IV, Boingneville, 12-14 May 1997. 25-43 pp. Wiss. Fachverlang. Dr. Fleck.
- Tiscareño, L. M., M. Tapia, A. Baéz y M. Velásquez V. 1998. Simulación de la lluvia para la caracterización hidrológica y de erosión de suelos bajo labranza convencional y labranza cero. Cap. VII Libro Científico No. 1. Uso de lluvia artificial para parametrizar modelos de procesos hidrológicos. SAGAR-INIFAP.
- Tiscareño, L. M., A. D. Báez González, M. Velásquez V., K. N. Potter, J. J. Stone, M. Tapia V. and R. Claverán A. 1999. Agricultural research for watershed restoration in Central México. *J. Soil & Water Cons.* (36):686-692.

- Torres-Benites, E., E. Mejía-Sáenz, J. Cortés-Becerra, E. Palacios-Vélez y A. Exebio-García. 2005. Adaptación de un modelo de simulación hidrológica a la cuenca del río Laja, Guanajuato, México. *Agrociencia* 39:481-490.
- TRAGSA. 2003. La ingeniería en los procesos de desertificación. Editado por Grupo TRAGSA. Ed. Mundi-Prensa, Madrid, España. 1043 p.
- Uribe-Gómez, S., M. del C. Gutierrez-Castorena, C. Tavares-Espinosa y A. Turrent-Fernández. 2000. Caracterización y clasificación de suelos de ladera manejados con terrazas de muro vivo en los Tuxtlas, Veracruz. *Agrociencia* 34:403-412
- U. S. Department of Agriculture (USDA), Natural Resources Conservation Service (NRCS). 1986. Urban hydrology for small watersheds. Technical Release 55, 2<sup>nd</sup> ed., NTIS PB87-101580, Springfield, Virginia.
- Van de Giesen, N., T. Stomph, and N. de Ridder. 2000. Scale effects of Hortonian overland flow and rainfall-runoff dynamics in a West African Catena landscape. *Hydrological Processes* 14:165-175.
- van Wanbeque, A. 1987. Soil moisture and temperature regimes of Central America Caribbean Mexico. Soil Management Support Services. Tech. Monogr. 16. Cornell Univ. N. Y. 32 p.
- Velásquez, M. A., M. Tiscareño L., R. Claverán A. y M. Gallardo V. 1997. Erosión y productividad bajo labranza de conservación I. Avances de investigación en suelos de ando de Michoacán. Folleto Técnico No. 1. INIFAP-CENAPROS. 34 p.
- Velásquez V., M. A. 2006. Análisis fractal de la rugosidad de un Andosol como indicador de su erosionabilidad. Tesis de Doctorado. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. 148 p.
- Velázquez G., J de J., J. Salinas G., K. Potter, M. Gallardo V., F. Caballero H y P. Díaz M. 2002. Cantidad, cobertura y descomposición de residuos de maíz sobre el suelo. *Terra Latinoamericana* 20(2):171-182
- Velázquez G., J de J. 2006. Reflectancia multiescalar de un Andosol en función de su manejo. Tesis de Doctorado. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. 189 p.
- Viessman, W., Jr. 1968. Runoff estimation for very small drainage basins. *Water Resour. Res.* 4 (1):87-93.

- Walkley, A. 1947. A critical examination of a rapid method for determining organic carbon in soils, effect of variations in digestion conditions and of inorganic soil constituents. *Soil Sci.* 63:251-263.
- Wanielista, M. P., and E. Shannon. 1977. An evaluation of best management practices for stormwater. East Central Florida Regional Planning Council, Winter Park, Fla.
- Warrington, D., I. Shainberg, M. Agassi and J. Morin. 1989. Slope and phosphogypsum's effect on runoff and erosion. *Soil Society of America Journal* 53:1201-1205
- Williams, J. R., and W. V. LaSeur. 1976. Water yield model using SCS Curve Number. *Am. Soc. Civ. Eng. J. Hydr. Div.* 102:1241-1253
- Williams, J. R., A. D. Nicks and J. G. Arnold. 1985. Simulator for waters resources in rural basins. *J. Hydraulic Eng., ASCE* 111: 970-976.
- Williams, J. R. 1990. EPIC-Erosion Productivity Impact Calculator. Volume 1. Model Documentation. Volume 2. User Manual. Submitted as USDA-ARS Technical Bulletin. 236 pp.
- Williams, J. R. 1991. Runoff and water erosion. pp. 439-455 *In:* Hanks, R. J. and Ritchie, J. T.: *Modeling Plant and Soil Systems*. Agronomy Series No. 31.
- Wishmeier, W. H. and D. D. Smith. 1978. Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. *Agric. Handbook No. 537*. USDA. Washington, D. C. 58 p.
- Wood, E. F., M. Sivapalan and K. Beven. 1986. Scale effects in infiltration and runoff. *IAHS Publications* 156:375-387
- Woodward, D. E., R. H. Hawkins, A. T. Hjelmfelt Jr., J. E. VanMullen and Q. D. Quan, 1999. Curve Number Method; Origins, applications and limitations (en línea): United States Department of Agriculture (USDA), Natural Resources Conservation Service (NRCS), <<ftp://ftp.wcc.nrcs.usda.gov/support/water/hydrology/Woodward.doc>>
- Woodward, D. E., R. H. Hawkins, R. Jiang, A. T. Hjelfment, J. A. Van Mullen and Q. D. Quan. 2003. Runoff Curve Number Method: Examination of the initial abstraction ratio. *World Water & Environmental Resources Congress 2003 and Related Symposia*. Philadelphia, Pennsylvania, USA.
- Woolhiser, D. A., R. E. Smith and D. C. Goodrich. 1990. Kineros, A kinematic runoff and erosion model: Documentation and User's Manual. U. S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, ARS, 130 pp

## VIII. ANEXOS

### Anexo 1. Coeficientes de escurrimiento para la ecuación racional en base al grupo hidrológico de suelo (A, B, C y D) y grado de pendiente

Uso del suelo	A			B			C			D		
	0-2%	2-6%	> 6%	0-2%	2-6%	> 6%	0-2%	2-6%	> 6%	0-2%	2-6%	> 6%
Tierras cultivadas	0.08 <sup>a</sup>	0.13	0.16	0.11	0.15	0.21	0.14	0.19	0.26	0.18	0.23	0.31
	0.14 <sup>b</sup>	0.18	0.22	0.16	0.21	0.28	0.20	0.25	0.34	0.24	0.29	0.41
Pastizal	0.12	0.20	0.30	0.18	0.28	0.37	0.24	0.34	0.44	0.30	0.40	0.50
	0.15	0.25	0.37	0.23	0.34	0.45	0.30	0.42	0.52	0.37	0.50	0.62
Pradera	0.10	0.16	0.25	0.14	0.22	0.30	0.20	0.28	0.36	0.24	0.30	0.40
	0.14	0.22	0.30	0.20	0.28	0.37	0.26	0.35	0.44	0.30	0.40	0.50
Bosque	0.05	0.08	0.11	0.08	0.11	0.14	0.10	0.13	0.16	0.12	0.16	0.20
	0.08	0.11	0.14	0.10	0.14	0.18	0.12	0.16	0.20	0.15	0.20	0.25
Zona residencial de 0.10 ha	0.22	0.26	0.29	0.24	0.29	0.33	0.27	0.31	0.36	0.30	0.34	0.40
	0.30	0.34	0.37	0.33	0.37	0.42	0.36	0.40	0.47	0.38	0.42	0.52
Zona residencial de 0.40 ha	0.14	0.19	0.22	0.17	0.21	0.26	0.20	0.25	0.31	0.24	0.29	0.35
	0.22	0.26	0.29	0.24	0.28	0.34	0.28	0.32	0.40	0.31	0.35	0.46
Calles	0.70	0.71	0.72	0.71	0.72	0.74	0.72	0.73	0.76	0.73	0.75	0.78
	0.76	0.77	0.79	0.80	0.82	0.84	0.84	0.85	0.89	0.89	0.91	0.95
Espacio abierto	0.05	0.10	0.14	0.08	0.13	0.19	0.12	0.17	0.24	0.15	0.21	0.28
	0.11	0.16	0.20	0.14	0.19	0.26	0.18	0.23	0.32	0.22	0.27	0.39

a y b = coeficientes de escurrimiento para periodos de retorno de precipitación menores y mayores a 25 años respectivamente

**Fuente:**

[http://www.utdallas.edu/~brikowi/Teaching/Applied\\_Modeling/SurfaceWater/LectureNotes/Rational\\_Method/Runoff\\_Coefficient.html](http://www.utdallas.edu/~brikowi/Teaching/Applied_Modeling/SurfaceWater/LectureNotes/Rational_Method/Runoff_Coefficient.html)

**Anexo 2. Temperatura media mensual del aire, GDD y acumulación de GDD para el cultivo de maíz durante el año de 1985 en Ajuno, Michoacán.**

DJ	Temperatura media (°C)	GDD	Σ GDD	DJ	Temperatura media (°C)	GDD	Σ GDD
130	6	-4	0	207	13	3	155
131	6	-4	0	208	13	3	158
132	7	-3	0	209	13	3	161
133	9	-1	0	210	12	2	163
134	10	0	0	211	12	2	165
135	9	-1	0	212	14	4	169
136	13	3	3	213	12	2	171
137	10	0	3	214	12	2	173
138	11	1	4	215	13	3	176
139	15	5	9	216	10	0	176
140	8	-2	9	217	12	2	178
141	7	-3	9	218	12	2	179
142	7	-3	9	219	11	1	180
143	11	1	10	220	13	3	183
144	9	-1	10	221	12	2	185
145	9	-1	10	222	13	3	188
146	12	2	12	223	13	3	191
147	12	2	14	224	11	1	192
148	12	2	16	225	11	1	193
149	13	3	19	226	11	1	194
150	13	3	22	227	14	4	198
151	10	0	22	228	14	4	202
152	11	1	23	229	15	5	207
153	7	-3	23	230	11	1	208
154	8	-2	23	231	12	2	210
155	10	0	23	232	13	3	213
156	10	0	23	233	10	0	213
157	11	1	24	234	14	4	217
158	14	4	28	235	13	3	220
159	11	1	29	236	14	4	224
160	13	3	32	237	14	4	228
161	13	3	35	238	15	5	233
162	10	0	35	239	14	4	237
163	10	0	35	240	13	3	240
164	14	4	39	241	13	3	243
165	17	7	46	242	12	2	245
166	14	4	50	243	14	4	249
167	13	3	53	244	15	5	253
168	11	1	54	245	11	1	254
169	14	4	58	246	13	3	257
170	15	5	63	247	16	6	263
171	14	4	67	248	11	1	264
172	15	5	72	249	12	2	266
173	14	4	76	250	8	-2	266
174	14	4	80	251	12	2	268
175	18	8	87	252	11	1	269
176	17	7	94	253	11	1	270
177	14	4	97	254	13	3	273
178	13	3	100	255	11	1	274
179	15	5	105	256	11	1	275
180	13	3	108	257	11	1	276
181	13	3	111	258	11	1	277
182	14	4	115	259	12	2	279
183	14	4	118	260	12	2	281
184	13	3	121	261	13	3	284
185	11	1	122	262	12	2	286
186	11	1	123	263	12	2	288
187	11	1	124	264	12	2	290
188	11	1	125	265	14	4	294
189	12	2	127	266	14	4	298
190	10	0	127	267	11	1	299
191	9	-2	127	268	10	0	299
192	11	1	128	269	11	1	300
193	10	0	128	270	12	2	302
194	12	2	129	271	12	2	303
195	12	2	131	272	10	0	303
196	14	4	135	273	11	1	304
197	11	1	136	274	12	2	306
198	11	1	136	275	10	0	306
199	12	2	138	276	12	2	308
200	12	2	140	277	8	-2	308
201	13	3	143	278	9	-1	308
202	10	0	143	279	12	2	310
203	15	5	148	280	14	4	314
204	14	4	152	281	15	5	319
205	11	1	153	282	12	2	321
206	10	0	153	283	12	2	323

DJ = Día juliano, GDD = Grados Días Desarrollo. Los días julianos 130 y 283 corresponden al 10 de mayo y 10 de octubre respectivamente

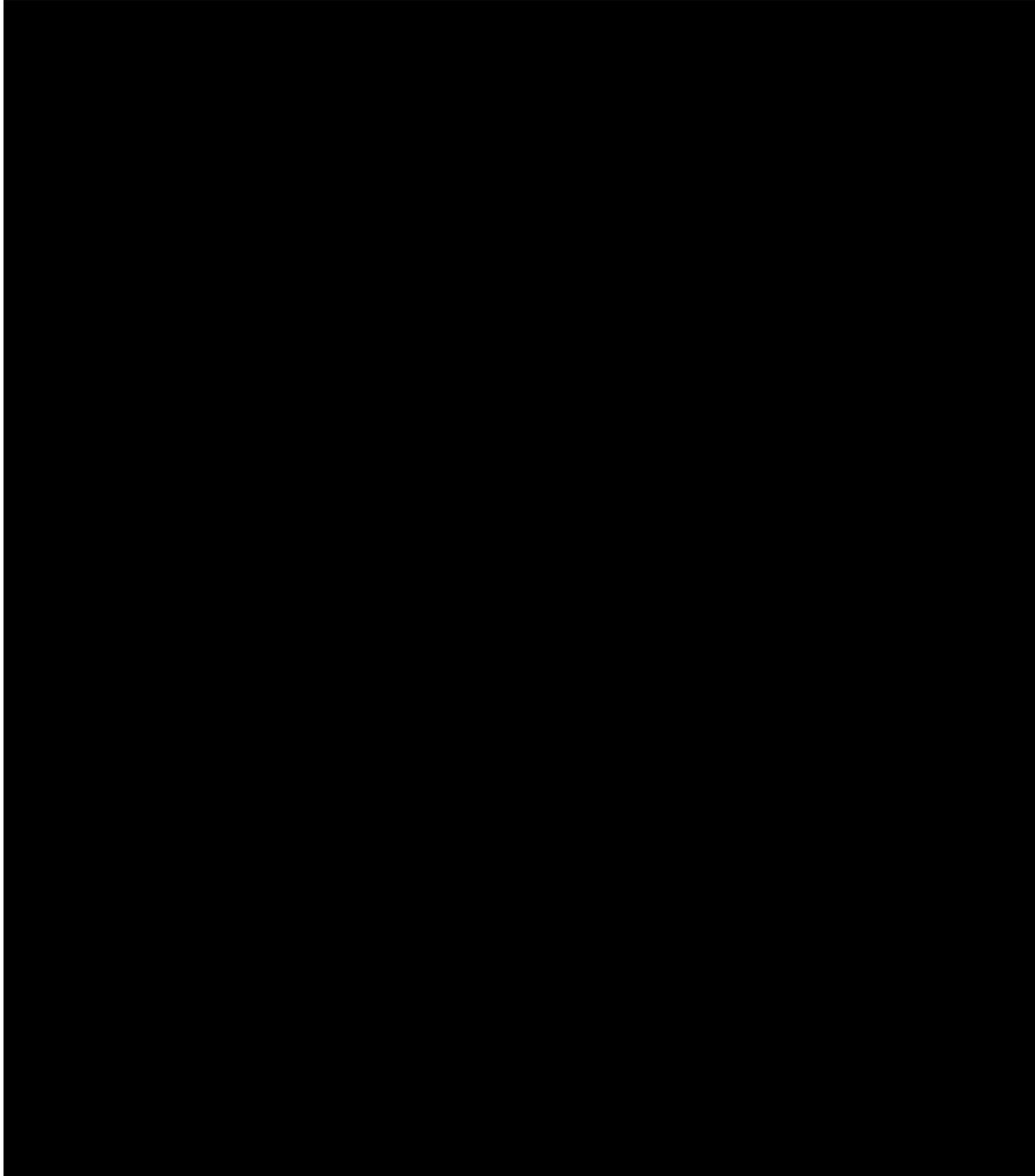
**Anexo 3. Temperatura media mensual del aire, GDD y acumulación de GDD para el cultivo de maíz durante el año de 2002 en Vistahermosa, Veracruz.**

DJ	Temperatura media (°C)	GDD	Σ GDD	DJ	Temperatura media (°C)	GDD	Σ GDD
172	24	14	14	250	30	20	1249
173	23	13	27	251	27	17	1266
174	26	16	43	252	26	16	1282
175	24	14	57	253	27	17	1299
176	29	19	76	254	24	14	1313
177	25	15	91	255	25	15	1328
178	27	17	108	256	26	16	1344
179	25	15	123	257	28	18	1362
180	30	20	143	258	30	20	1382
181	25	15	158	259	26	16	1398
182	28	18	176	260	25	15	1413
183	27	17	193	261	27	17	1430
184	28	18	211	262	28	18	1448
185	26	16	227	263	21	11	1459
186	24	14	241	264	25	15	1474
187	23	13	254	265	24	14	1488
188	22	12	266	266	25	15	1503
189	27	17	283	267	24	14	1517
190	25	15	298	268	25	15	1532
191	27	17	315	269	24	14	1546
192	28	18	333	270	23	13	1559
193	26	16	349	271	22	12	1571
194	26	16	365	272	23	13	1584
195	26	16	381	273	27	17	1601
196	27	17	398	274	22	12	1613
197	27	17	415	275	25	15	1628
198	26	16	431	276	27	17	1645
199	24	14	445	277	28	18	1663
200	27	17	462	278	31	21	1684
201	27	17	479	279	23	13	1697
202	26	16	495	280	26	16	1713
203	25	15	510	281	26	16	1729
204	28	18	528	282	26	16	1745
205	23	13	541	283	25	15	1760
206	24	14	555	284	20	10	1770
207	28	18	573	285	25	15	1785
208	22	12	585	286	23	13	1798
209	28	18	603	287	22	12	1810
210	27	17	620	288	22	12	1822
211	28	18	638	289	23	13	1835
212	26	16	654	290	25	15	1850
213	25	15	669	291	25	15	1865
214	27	17	686	292	24	14	1879
215	22	12	697	293	24	14	1893
216	26	16	713	294	24	14	1907
217	24	14	727	295	23	13	1920
218	27	17	744	296	24	14	1934
219	27	17	761	297	28	18	1952
220	24	14	775	298	28	18	1970
221	27	17	792	299	27	17	1987
222	30	20	812	300	29	19	2006
223	26	16	828	301	22	12	2018
224	28	18	846	302	26	16	2034
225	27	17	863	303	27	17	2051
226	24	14	877	304	25	15	2066
227	23	13	890	305	22	12	2078
228	28	18	908	306	26	16	2094
229	28	18	926	307	25	15	2109
230	26	16	942	308	25	15	2124
231	26	16	958	309	26	16	2140
232	26	16	974	310	23	13	2153
233	27	17	991	311	20	10	2163
234	26	16	1007	312	20	10	2173
235	23	13	1020	313	23	13	2186
236	24	14	1034	314	23	13	2199
237	26	16	1050	315	24	14	2213
238	27	17	1067	316	20	10	2223
239	27	17	1084	317	19	9	2232
240	22	12	1096	318	20	10	2242
241	23	13	1109	319	20	10	2252
242	28	18	1127	320	22	12	2264
243	27	17	1144	321	16	6	2270
244	28	18	1162	322	16	6	2276
245	26	16	1178	323	15	5	2281
246	26	16	1194	324	14	4	2285
247	27	17	1211	325	19	9	2294
248	29	19	1230	326	20	10	2304
249	29	19	1249	327	20	10	2314

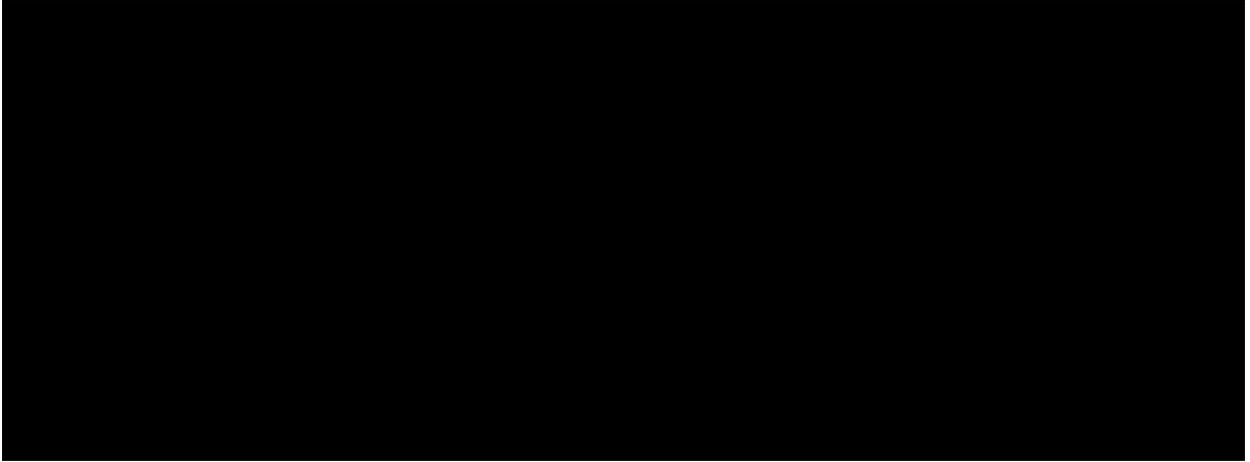
Los días julianos 172 y 327 corresponden al 21 de junio y 23 de noviembre respectivamente

**Anexo 4. Variabilidad del coeficiente de escurrimiento mensual para diferentes sistemas de manejo en los dos sitios de estudio.**

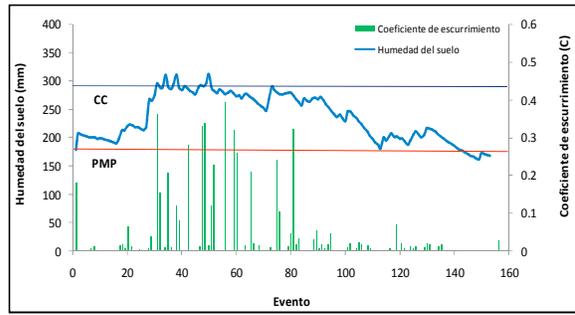
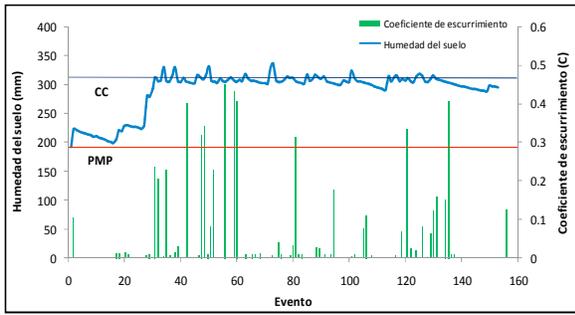
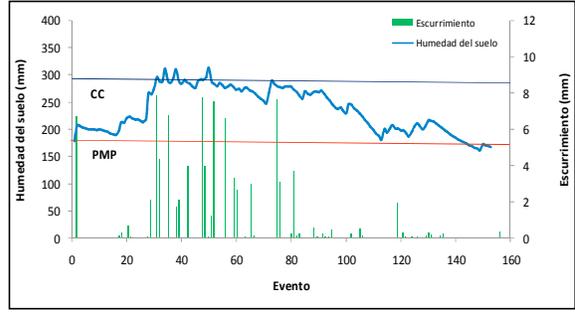
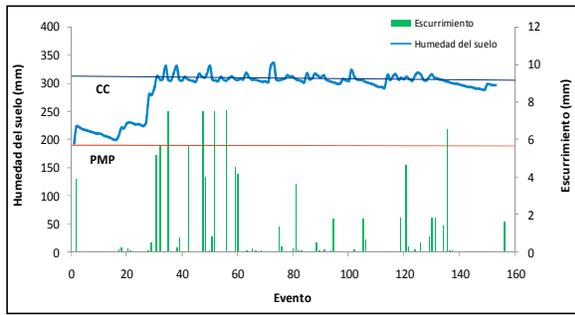
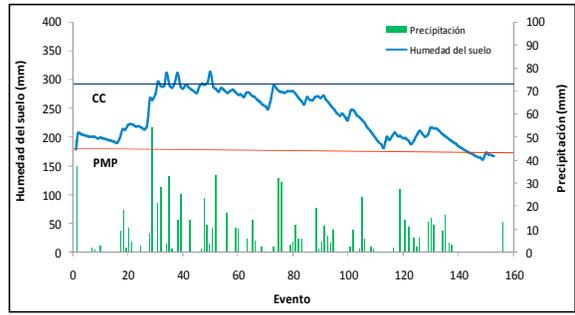
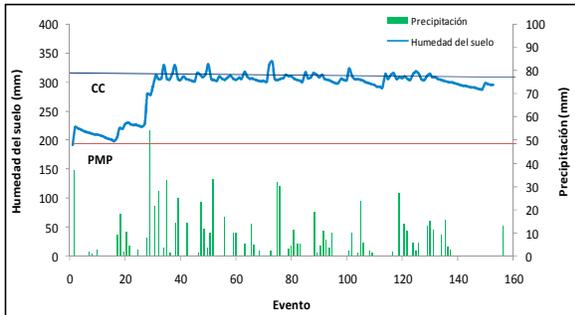
**Sitio 1**



## Sitio 2

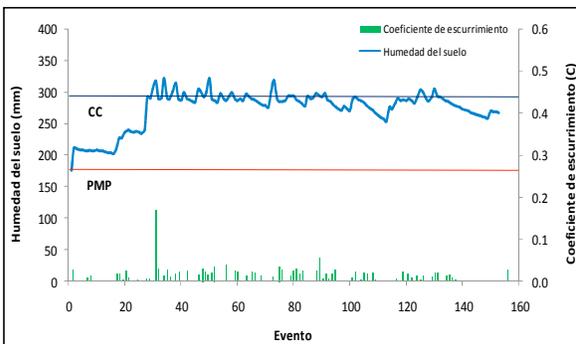
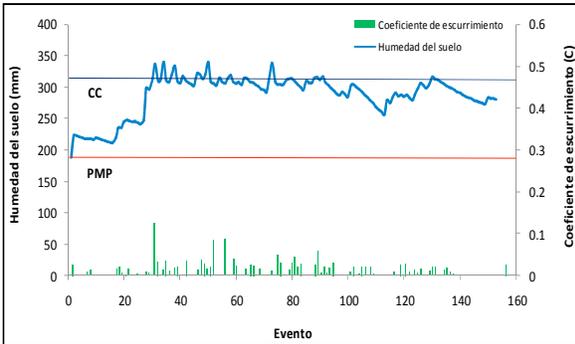
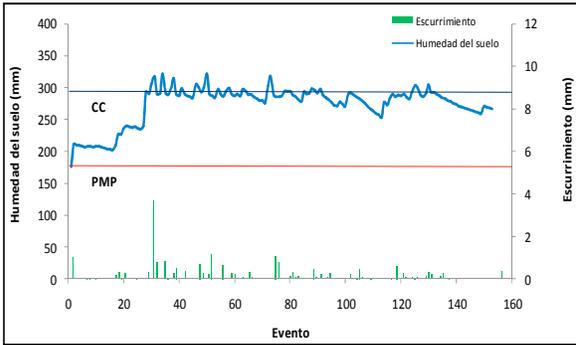
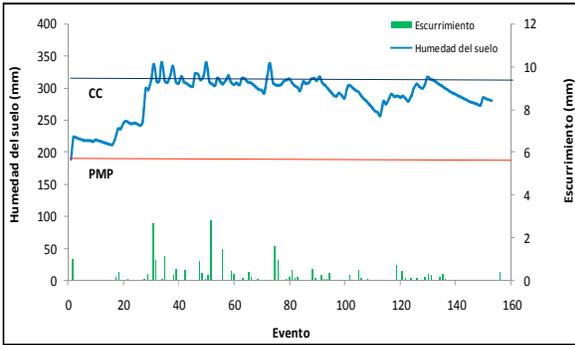
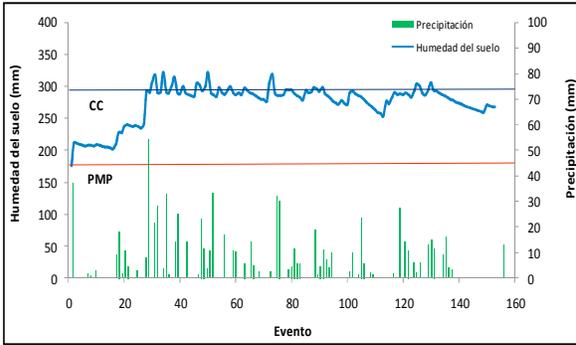
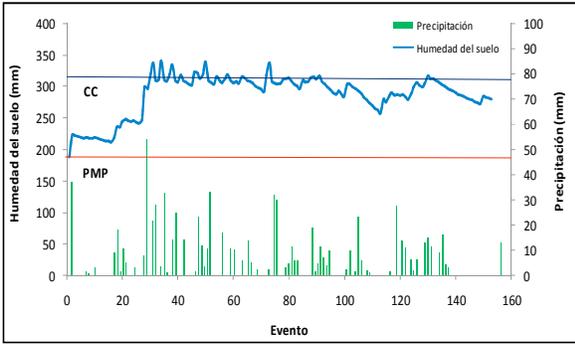


**Anexo 5. Balance hídrico para los sistemas de manejo de suelo para los sitios 1 (SD, L0 0%, L0 33%, L0 66% y LM) y sitio 2 (L0 100%) para el año de 1996.**



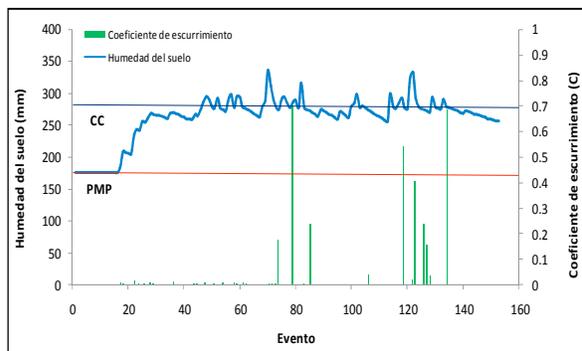
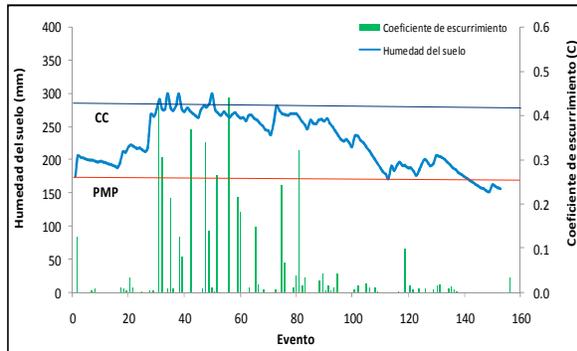
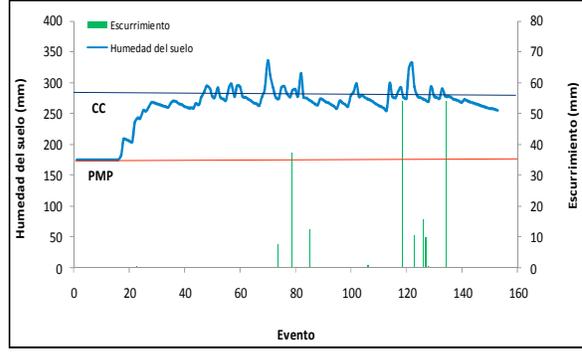
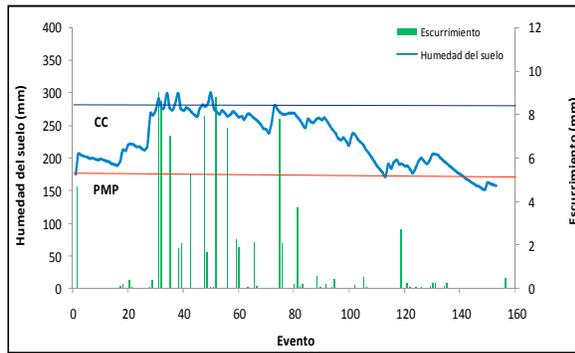
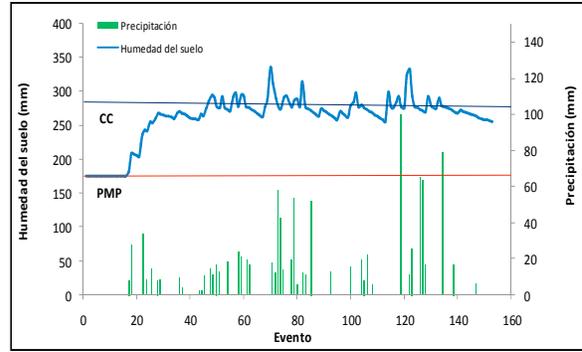
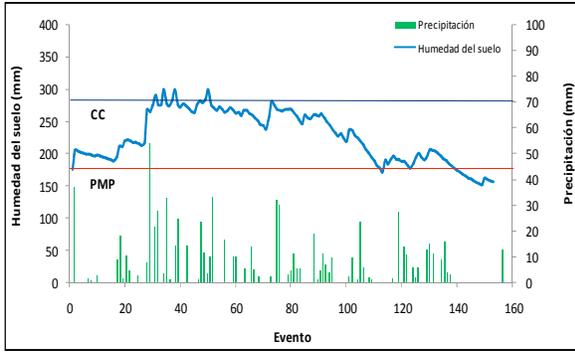
**SD**

**L0 0%**



**L0 33%**

**L0 66%**



LM

LO 100%, sitio 2