



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE HIDROCIENCIAS

EFFECTO DE LA COBERTURA VEGETAL Y RAÍCES EN LA EROSIÓN DEL SUELO

JOSÉ DE JESÚS HUERTA OLAGUE

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS

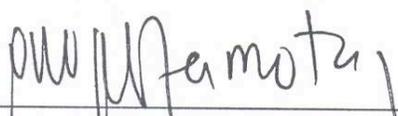
MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

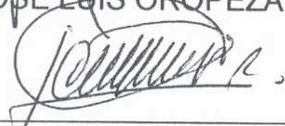
2007

La presente tesis, titulada: **Efecto de la cobertura vegetal y raíces en la erosión del suelo**, realizada por el alumno: **José de Jesús Huerta Olague**, 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**

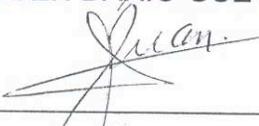
CONSEJO PARTICULAR

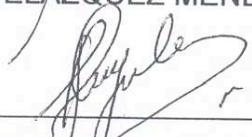
CONSEJERO: 
DR. JOSÉ LUIS OROPEZA MOTA

ASESOR: 
M. C. JOSÉ DONALDO RÍOS BERBER

ASESOR: 
DR. MARIO ROBERTO MARTÍNEZ MENES

ASESOR: 
M. C. RUBÉN DARÍO GUEVARA GUTIÉRREZ

ASESOR: 
DR. JUAN VELÁZQUEZ MENDOZA

ASESOR: 
DR. CARLOS RAMÍREZ AYALA

Montecillo, Texcoco, Estado de México, 10 octubre de 2007

EFECTO DE LA COBERTURA VEGETAL Y RAÍCES EN LA EROSIÓN DEL SUELO

José de Jesús Huerta Olague, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2007

Se evaluó el efecto de la cobertura vegetal y de las raíces, de maíz (*Zea mays* L.), frijol (*Phaseolus vulgaris* L.), calabacita (*Cucurbita pepo* L.) y avena (*Avena sativa* L.), sobre el escurrimiento superficial y la pérdida de suelo. El trabajo se realizó en un campo experimental de la Universidad Autónoma Chapingo y se utilizaron 8 tratamientos, 2 para cada cultivo (4 fueron subparcelas con cobertura vegetal y 4 subparcelas sin cobertura y solo con raíces, mismas que resultaron de cortar al ras del suelo los cultivos estudiados. La cobertura vegetal se midió en porcentaje y el sistema radical en densidad longitudinal de raíces (DLR). Se aplicó lluvia simulada a los 15, 30, 50 y 65 días de desarrollo sobre lotes de escurrimiento de 1 m² y 10% de pendiente para cuantificar los volúmenes escurridos y la erosión del suelo. Se encontraron relaciones exponenciales negativas entre el escurrimiento superficial y la cobertura vegetal, y entre la pérdida de suelo y la cobertura vegetal, en todos los cultivos. El sistema radical de los cultivos, expresado como DLR, de la capa superficial del suelo (0-10 cm de profundidad) mostró que a medida que aumentó la DLR, disminuyeron las pérdidas de suelo y los escurrimientos superficiales permanecieron casi constantes y solo en el caso de maíz mostró una tendencia en la reducción de los escurrimientos. Se concluyó que el sistema cobertura vegetal-raíces de los cultivos estudiados presentó más efecto para reducir el escurrimiento superficial y la pérdida de suelo que únicamente el sistema radical. Los cultivos de escarda (maíz, frijol y calabacita) son menos eficientes para reducir las pérdidas de suelo, y de estos el maíz fue el menos eficiente y fue el cultivo tupido (avena) que por su follaje y sistema radical protegió más al suelo de la erosión y provocó mayor infiltración del agua en el suelo.

Palabras clave: escurrimiento superficial, pérdida de suelo, cobertura vegetal, raíces.

EFFECT OF THE VEGETATIVE COVER AND ROOTS ON SOIL EROSION

José de Jesús Huerta Olague, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2007

The effects of vegetative cover and roots were evaluated, under maize (*Zea mays* L.), beans (*Phaseolus vulgaris* L.), pumpkins (*Cucurbita pepo* L.), and oats (*Avena sativa* L.) on surface runoff and soil loss. This study was conducted in a field experimental station of the Autonomous University of Chapingo and there were established eight treatments, with two treatments for each crop (four treatments were subplots with vegetative cover and four subplots without vegetative cover and only with roots) which resulted from cutting of crops studied at the soil surface. The vegetative cover was measured in percentage and the root system in root length density (RLD). Simulated rainfall was applied at 15, 30, 50 and 65 days of crop development on runoff plots of 1 m² and 10% slope to quantify the runoff volumes and the soil erosion. Negative exponential relationships were found between the surface runoff and the vegetative cover, and between the soil loss and the vegetative cover, in all the crops. The root system of the crops, expressed as RLD, for the surface layer of the soil (0-10 cm depth) showed that while RLD increased, the soil losses decreased and the surface runoff remained almost constant, and only in case of maize, demonstrated a declining tendency of the runoff. It was concluded that the vegetative cover-root system of the crops studied presented more effect on reducing the surface runoff and the soil loss than only the root system. The row crops (maize, beans, and pumpkins) were less efficient on reducing the soil loss, and between these crops, maize was the least efficient and a dense crop (oats) was that for its foliage and root system protected the soil more from the erosion and provoked higher infiltration of water in the soil.

Keywords: surface runoff, soil loss, vegetative cover, roots.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente le agradezco a mi **Padre Dios** por darme la vida, la salud y el entendimiento para concluir una meta más en mi camino. Por darme la oportunidad de enriquecer mi vida con conocimientos nuevos, mismos que compartiré con agrado con las personas que me rodean, esperando aportar en ellos algo de lo poquito o mucho que he aprendido. Por todo esto y por muchas cosas más siempre te estaré eternamente agradecido.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología** (CONACYT) por el apoyo económico otorgado, lo que permitió que llevara a cabo esta maestría, mi más sincero agradecimiento para esta institución

Al **Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo** por darme la oportunidad de estudiar en esta bonita institución de la que me siento orgulloso.

A mi país **México**, al estado que me vio nacer **Jalisco**, a mi municipio **Autlán de Navarro** y a mi pueblo **El Corcovado** por darme la oportunidad de estudiar durante mi vida y darme una identidad tan bella, ser jalisciense.

A mi director de tesis

Dr. José Luíz Oropeza Mota por su amistad, confianza, apoyo y paciencia, siempre dispuesto al desarrollo de este trabajo.

A mis asesores

M.C. José Donald Ríos Berber por su amistad, apoyo, tiempo y valiosa ayuda durante el desarrollo de este trabajo.

Dr. Mario R. Martínez Menes por su amistad, paciencia, tiempo, consejos y por su valiosa contribución al desarrollo de esta investigación, muchas gracias.

M.C. Rubén Darío Guevara Gutiérrez primeramente por su amistad, valiosa ayuda y apoyo siempre que lo necesite, mil gracias.

Dr. Juan Velázquez Mendoza por su amistad, tiempo, valiosa y excelente ayuda que hicieron posible este trabajo.

Dr. Carlos Ramírez Ayala por su amistad, consejos y disposición, lo cual hizo posible esta investigación.

A todos los maestros del Colegio que me transmitieron sus conocimientos durante mi estancia en esta institución, para todos ellos las más sinceras gracias.

A la señora **Ma. Salustia Chávez Espinosa** por su valiosa amistad, ayuda y disposición cada que la necesite, mil gracias siempre le estaré muy agradecido.

A mis amigos y compañeros del Postgrado de Hidrociencias **Elías Raymundo Raymundo, Alejandro Romero Bautista “El presi”, José Sabino Chávez Chan, Jorge López Ortiz, Jorge Arturo Salgado Transito y a Javier Tiburcio Rosales** por su amistad, ayuda, tiempo, consejos y cariño. Siempre los recordaré con agrado.

A mi amigo **Polile Augustine Molumeli** por sus consejos, ayuda y compañía durante mi estancia en Texcoco.

A todas aquellas personas que apoyaron la realización del presente trabajo.

A TODOS Y CADA UNO DE ELLOS

MIL GRACIAS

DEDICATORIAS

A mi **Padre Dios** por ser tú quien me ayuda y me acompaña siempre, en todo momento y en cualquier lugar. Por darme la fortaleza para salir adelante, lleno de satisfacciones y orgullo.

A mis Padres José de Jesús Huerta Aréchiga y Dora Eduwiges Olague Díaz. Por su apoyo en cada etapa de mi vida, por todo su amor y cariño, por apoyarme en todos los sentidos para que se cumpliera una meta más en mi vida.

A mis Hermanas Dora Lilí Huerta Olague y Dorian Clarisse Huerta Olague. A ellas les agradezco todo su amor hacia mí, sus consejos y por ser unas hermanas admirables.

A mi Novia María Elena Díaz Robles. Por todo el amor que me das, por tu apoyo moral, por tenerme paciencia, por amarme y aceptarme así como soy.

A mis abuelos maternos **Telésforo Olague Estrella** y **†María del Carmen Díaz Horta** y paternos **Domingo Huerta Magdaleno** y **†María Trinidad Aréchiga Ruiz** por todo el amor, cariño y consejos que siempre he recibido de ustedes, por que se que desde donde estén siempre van a estar conmigo. Los quiero mucho.

A mis Amigos y Compañeros. Por su invaluable amistad por tenerme paciencia, por tener siempre para mí consejos y palabras de aliento, para ellos todo mí respeto y cariño.

Y a todas aquellas personas que de alguna u otra forma, colaboraron o participaron en la realización de esta investigación, hago extensivo mi más sincero agradecimiento.

CON AMOR Y RESPETO

PARA ELLOS

CONTENIDO

| | Página |
|---|-----------|
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 1.1 Antecedentes..... | 1 |
| 1.2 Justificación..... | 4 |
| 2. REVISIÓN DE LITERATURA..... | 6 |
| 2.1. El proceso de la erosión..... | 6 |
| 2.2. Escurrimiento superficial..... | 7 |
| 2.3. Cobertura vegetal..... | 8 |
| 2.3.1. Métodos para medir cobertura vegetal..... | 9 |
| 2.3.2. La cobertura vegetal y la erosión hídrica del suelo..... | 10 |
| 2.4. Raíces..... | 14 |
| 2.4.1. Métodos de estudio de las raíces..... | 15 |
| 2.4.2. Morfología y funcionalidad de las raíces..... | 17 |
| 2.4.3. Las raíces y las propiedades que controlan la erosionabilidad del suelo..... | 17 |
| 2.4.4. Raíces y la erosión hídrica del suelo..... | 19 |
| 2.5. Simuladores de lluvia..... | 22 |
| 2.6. Conclusión de la revisión de literatura..... | 23 |
| 3. OBJETIVOS HIPÓTESIS Y SUPUESTOS..... | 25 |
| 3.1. Objetivos..... | 25 |
| 3.2. Hipótesis..... | 25 |
| 3.3. Supuestos..... | 25 |
| 4. MATERIALES Y MÉTODOS..... | 26 |
| 4.1. Descripción del área de estudio..... | 26 |
| 4.1.1. Localización..... | 26 |
| 4.1.2. Clima..... | 27 |

| | |
|---|-----------|
| 4.1.3. Suelo..... | 28 |
| 4.2. Diseño de tratamientos..... | 28 |
| 4.3. Descripción de los cultivos utilizados..... | 31 |
| 4.3.1. Cultivo de maíz..... | 31 |
| 4.3.2. Cultivo de frijol..... | 32 |
| 4.3.3. Cultivo de calabacita..... | 33 |
| 4.3.4. Cultivo de avena..... | 34 |
| 4.4. Preparación del terreno..... | 35 |
| 4.5. Siembra, densidad, espaciamiento y fertilización..... | 35 |
| 4.6. Manejo de cultivos..... | 36 |
| 4.7. Variables en estudio y metodologías empleadas..... | 36 |
| 4.7.1. Cobertura vegetal..... | 36 |
| 4.7.2. Raíces..... | 40 |
| 4.7.2.1. Cubeta muestreadora, instalación en el campo y extracción de raíces..... | 40 |
| 4.7.2.2. Cuantificación de raíces (densidad longitudinal de raíces).. | 42 |
| 4.7.3. Escurrimiento superficial y pérdida de suelo..... | 45 |
| 4.8. Toma de datos..... | 47 |
| 4.9. Modelos utilizados..... | 49 |
| 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 50 |
| 5.1. Desarrollo de la cobertura vegetal..... | 50 |
| 5.1.1. Comparación del desarrollo de la cobertura vegetal en los cultivos | 51 |
| 5.2. Desarrollo de las raíces..... | 54 |
| 5.2.1. Comparación del desarrollo de las raíces en los cultivos..... | 55 |
| 5.3. Comparación de la evolución de la cobertura vegetal y las raíces..... | 56 |
| 5.4. Escurrimiento superficial..... | 59 |
| 5.4.1. Escurrimiento superficial en las subparcelas con cobertura vegetal | 59 |
| 5.4.2. Escurrimiento superficial en las subparcelas sin cobertura (raíces) | 65 |

| | |
|--|------------|
| 5.5. Comparación del escurrimiento superficial en subparcelas con cobertura vegetal y sin cobertura (raíces)..... | 67 |
| 5.6. Pérdida de suelo..... | 70 |
| 5.6.1. Pérdida de suelo en subparcelas con cobertura vegetal..... | 70 |
| 5.6.1.1. Correlación entre la pérdida de suelo y el escurrimiento superficial en subparcelas con cobertura vegetal..... | 75 |
| 5.6.2. Pérdida de suelo en subparcelas sin cobertura (raíces)..... | 76 |
| 5.6.2.1. Correlación entre la pérdida de suelo y el escurrimiento superficial en subparcelas sin cobertura (raíces)..... | 81 |
| 5.7. Comparación de la pérdida de suelo en subparcelas con cobertura vegetal y sin cobertura (raíces)..... | 82 |
| 5.8. Cálculo del factor C..... | 85 |
| 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 86 |
| 6.1. Conclusiones..... | 86 |
| 6.2. Recomendaciones..... | 87 |
| 7. LITERATURA CITADA..... | 88 |
| 8. ANEXO..... | 100 |
| ANEXO A. Densidad longitudinal de raíces (DLR), por cultivo, en capas de 10 cm hasta una profundidad de 35 cm..... | 100 |

LISTA DE CUADROS

| | | Página |
|------------|---|--------|
| Cuadro 1. | Descripción de los tratamientos evaluados..... | 29 |
| Cuadro 2. | Densidad de población, variedad y fertilización..... | 36 |
| Cuadro 3. | Ejemplo de cálculo del porcentaje de cobertura vegetal..... | 39 |
| Cuadro 4. | Evolución de la cobertura vegetal, según días de desarrollo..... | 51 |
| Cuadro 5. | Descripción del comportamiento modelado de la cobertura vegetal, utilizando las ecuaciones de mayor ajuste..... | 53 |
| Cuadro 6. | Evolución de la DLR en la capa 0-10 cm, según días de desarrollo..... | 54 |
| Cuadro 7. | Descripción del comportamiento modelado de la DLR, utilizando las ecuaciones de mayor ajuste..... | 56 |
| Cuadro 8. | Escurrimiento superficial y cobertura vegetal en subparcelas con cobertura vegetal, según días de desarrollo..... | 60 |
| Cuadro 9. | Escurrimiento superficial en subparcelas con cobertura vegetal, al inicio del desarrollo de los cultivos y sus tasas de decrecimiento, de acuerdo al comportamiento modelado..... | 64 |
| Cuadro 10. | Escurrimiento superficial y DLR en subparcelas sin cobertura (raíces), según días de desarrollo..... | 65 |
| Cuadro 11. | Pérdida de suelo en subparcelas con cobertura vegetal, al inicio del desarrollo de los cultivos y sus tasas de decrecimiento, de acuerdo al comportamiento modelado..... | 74 |
| Cuadro 12. | Pérdida de suelo obtenida en subparcelas con cobertura vegetal y sin cobertura (raíces), según días de desarrollo..... | 82 |
| Cuadro 13. | Cálculo del factor C..... | 85 |

LISTA DE FIGURAS

| | Página |
|--|--------|
| Figura 1. Localización del área de estudio. “Lomas de San Juan”, Chapingo, Edo. de México..... | 26 |
| Figura 2. Climograma de la zona de estudio..... | 27 |
| Figura 3. Diseño y localización de las parcelas bajo estudio..... | 30 |
| Figura 4. Crecimiento y desarrollo de la planta de maíz..... | 31 |
| Figura 5. Crecimiento y desarrollo de la planta de frijol..... | 32 |
| Figura 6. Crecimiento y desarrollo de la planta de calabacita..... | 33 |
| Figura 7. Crecimiento y desarrollo de la planta de avena..... | 34 |
| Figura 8. Preparación de las camas de siembra..... | 35 |
| Figura 9. La imagen rotada y recortada. a) Fotografía original b) Recorte del área de interés..... | 37 |
| Figura 10. Fotografía separada en tres bandas..... | 37 |
| Figura 11. Polígonos de las dos clases de firmas deseadas: suelo (azul) y verde (vegetación)..... | 38 |
| Figura 12. Resultado de la clasificación supervisada, vegetación (rojo) y suelo (amarillo)..... | 39 |
| Figura 13. Estructura de la cubeta muestreadora de raíces..... | 40 |
| Figura 14. Cubetas muestreadoras usadas para el estudio de las raíces..... | 41 |
| Figura 15. Extracción de las raíces del suelo..... | 41 |

| | | |
|------------|--|----|
| Figura 16. | Método de Böhm (1979), secuencia para lavar y retirar la humedad de las raíces..... | 42 |
| Figura 17. | Determinación de la longitud total de raíces por el método de Tennant (1975)..... | 43 |
| Figura 18. | Simulador de lluvias tipo Purdue..... | 46 |
| Figura 19. | Secuencia seguida en cada fecha de simulación de lluvia donde siempre se comparó una subparcela con cobertura vegetal con una subparcela sin cobertura (raíces)..... | 48 |
| Figura 20. | Evolución de la cobertura vegetal, durante el periodo experimental. Cobertura vegetal (rojo) y suelo (amarillo)..... | 52 |
| Figura 21. | Comportamiento modelado de la cobertura vegetal de los cultivos durante el ciclo experimental..... | 53 |
| Figura 22. | Comportamiento modelado de la DLR de los cultivos durante el ciclo experimental..... | 55 |
| Figura 23. | Comparación de la evolución de la cobertura vegetal y la DLR en maíz..... | 57 |
| Figura 24. | Comparación de la evolución de la cobertura vegetal y la DLR en frijol..... | 58 |
| Figura 25. | Comparación de la evolución de la cobertura vegetal y la DLR en calabacita..... | 58 |
| Figura 26. | Comparación de la evolución de la cobertura vegetal y DLR en avena..... | 59 |
| Figura 27. | Cobertura vegetal y escurrimiento superficial en maíz..... | 61 |
| Figura 28. | Cobertura vegetal y escurrimiento superficial en frijol..... | 62 |
| Figura 29. | Cobertura vegetal y escurrimiento superficial en calabacita..... | 63 |
| Figura 30. | Cobertura vegetal y escurrimiento superficial en avena..... | 63 |

| | | |
|------------|--|----|
| Figura 31. | Escurrimiento superficial y DLR en los cultivos bajo estudio..... | 66 |
| Figura 32. | Escurrimiento superficial obtenido en subparcelas con cobertura vegetal y sin cobertura (raíces), según días de desarrollo..... | 68 |
| Figura 33. | Escurrimiento superficial promedio en subparcelas con cobertura vegetal y sin cobertura (raíces) de los cultivos bajo estudio..... | 69 |
| Figura 34. | Pérdida de suelo y cobertura vegetal en maíz..... | 71 |
| Figura 35. | Pérdida de suelo y cobertura vegetal en frijol..... | 72 |
| Figura 36. | Pérdida de suelo y cobertura vegetal en calabacita..... | 73 |
| Figura 37. | Pérdida de suelo y cobertura vegetal en avena..... | 73 |
| Figura 38. | Modelos de regresión entre la pérdida de suelo y el escurrimiento superficial en subparcelas con cobertura vegetal... | 75 |
| Figura 39. | Pérdida de suelo y DLR en maíz..... | 77 |
| Figura 40. | Pérdida de suelo y DLR en frijol..... | 78 |
| Figura 41. | Pérdida de suelo y DLR en calabacita..... | 79 |
| Figura 42. | Pérdida de suelo y DLR en avena..... | 79 |
| Figura 43. | Modelos de regresión entre la pérdida de suelo y la DLR en subparcelas sin cobertura (raíces)..... | 81 |
| Figura 44. | Pérdida de suelo obtenida en subparcelas con cobertura vegetal y sin cobertura (raíces)..... | 83 |
| Figura 45. | Pérdida de suelo promedio en subparcelas con cobertura vegetal y sin cobertura (raíces) para los cultivos bajo estudio..... | 84 |

1. INTRODUCCION

A nivel mundial, existen más de 305 millones de hectáreas que tienen una alta degradación explicada principalmente por la alta deforestación de más de 12.3 millones de hectáreas anuales (Faminow, 1998). En México se ha reportado que existen más de 50 millones de hectáreas con alta degradación, que se ha acelerado por el cambio de uso del suelo, la agricultura de ladera y la deforestación de más de 600,000 ha año⁻¹ (Lal, 2000).

Para tratar de reducir el proceso erosivo en México, se han utilizado las prácticas mecánicas y recientemente las prácticas vegetativas que consisten en el uso de residuos de cosecha, coberturas vegetales densas y especies vegetales con sistemas radicales desarrollados que retienen el suelo, como estrategias mas eficientes y económicas para reducir la erosión.

Es incuestionable el papel de la cobertura vegetal y las raíces de los cultivos para proveer protección a los terrenos agrícolas, ya que el follaje reduce el impacto de las gotas de lluvia, disminuye el escurrimiento superficial y las pérdidas de suelo, y las raíces retienen el suelo con lo cual evitan que se pierdan millones de toneladas de suelo productivo de los terrenos agrícolas de ladera en México. Por ello, en este trabajo se evaluó la capacidad de protección al suelo de la cobertura vegetal y raíces de cuatro cultivos: maíz (*Zea mays* L.), frijol (*Phaseolus vulgaris* L.), calabacita (*Cucúrbita pepo* L.) y avena (*Avena sativa* L.) en cuatro períodos de desarrollo, en parcelas de 10% de pendiente, subdivididas en subparcelas o lotes de escurrimiento de 1 m², utilizando lluvia simulada a una intensidad constante de 80 mm h⁻¹ y midiendo los escurrimientos superficiales y las pérdidas del suelo.

1.1. Antecedentes

Pese a que muchas investigaciones concluyen que la reducción en la pérdida de suelo se debe a la cobertura vegetal, en realidad la reducción en la pérdida del

suelo resulta del efecto combinado del sistema raíces-biomasa aérea (Gyssels y Poesen, 2003; Gyssels *et. al.*, 2005).

Resultados de investigaciones realizadas en Paraná, Brasil, mostraron que en el período inicial de los cultivos de escarda (del establecimiento a los 30 a 40 días de desarrollo) fue el maíz el que mas protegió al suelo de la erosión seguido de los cultivos de soya y algodón y que fue este periodo en el cual se presenta prácticamente todo el problema de la erosión. Después de este periodo ocurre una efectiva protección del suelo por los cultivos y hay una considerable reducción de la pérdida de suelo (IAPAR, 1978, citado por FAO, 2000).

Loch (2000) y McIvor *et al.* (1995) señalaron que el uso de las coberturas vegetales es sumamente importante en áreas agrícolas ya que reducen la erosión de los suelos, sobre todo en terrenos de fuertes pendientes. Este efecto se atribuye a la cobertura vegetal y a los residuos del cultivo, que disminuyen el impacto de las gotas de lluvia, absorben la energía de la lluvia, aumentan la infiltración del agua en el suelo y la rugosidad del terreno lo que reduce el escurrimiento y su capacidad de transporte, además del efecto de las raíces de las plantas para retener al suelo en su lugar. La misma circunstancia se manifiesta en los trabajos realizados por Ibarra *et al.* (1992), Snelder y Bryan (1995), McIvor *et al.* (1995), Belmonte *et al.* (1998), Carroll *et al.* (2000), Betancourt *et al.* (2000) y Ramírez y Oropeza (2001). Estos trabajos establecen que la cobertura vegetal (forestal, agrícola o pastizal) disminuye la remoción de partículas de suelo por impacto de las gotas de lluvia, reduce los escurrimientos superficiales y su capacidad para transportar sedimentos, asimismo aumenta la capacidad de infiltración del suelo. En suelos bajo coberturas vegetales agrícolas la reducción del escurrimiento y erosión es menor que en suelos bajo coberturas de pastizal o forestal (Osuna y Esquivel, 1996). Sobre este mismo tema, Serna y Echavarría (2002) estudiaron cuatro coberturas vegetales: pastizal (P), nopal denso (ND), nopal-pasto-cobertura media (NCM) y nopal-pasto-cobertura baja (NCB), sobre un área excluida al pastoreo, en condiciones de lluvia natural durante dos años. Sus resultados muestran que las pérdidas promedio de suelo durante este

periodo se comportaron así: $ND < NCM < P < NCB$. Lo que indica que la cobertura vegetal fue decisiva en la reducción del proceso erosivo.

Asimismo, Brennenman y Laflen (1982), afirman que la cobertura vegetal reduce la erosión hídrica en dos formas: 1) al proteger el suelo contra el impacto directo de las gotas de lluvia, disminuyendo el salpicado, y además el efecto cementante del sistema radical sobre las partículas en el perfil del suelo, que causa modificaciones a la estructura del suelo; y 2) al incrementar el contenido de materia orgánica debido a la descomposición de las raíces y la subsecuente formación de cavidades tubulares que mejoran el movimiento de aire y agua en el suelo. De esta manera, al incrementarse la rugosidad hidráulica del terreno disminuye el escurrimiento superficial y la velocidad del flujo y se incrementa el tiempo de oportunidad para la infiltración, reduciéndose con ello la pérdida de suelo.

De la misma forma en trabajos realizados sobre esta área de estudio se encuentra Figueroa (1975), quién reportó que el tipo de vegetación tiene un papel importante en la erosión, ya que en zonas boscosas las pérdidas anuales de suelo son de menos de $20 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, en pastizales de $43 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, en zacatonales de $665 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, en áreas cultivadas de $3,059 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y en áreas degradadas de $16,078 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Esto indica que a medida que aumenta la cobertura vegetal se reducen las pérdidas de suelo

Por su parte Ríos y Martínez (1990) al estudiar el efecto de las coberturas vegetales en la reducción de las pérdidas de suelo y escurrimiento superficial, encontraron que los cultivos tupidos de alta densidad (cebada, avena y trigo) tuvieron pérdidas de suelo y lámina escurrida promedio de $1,168.5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y 29.6 mm , éstos resultaron significativamente más eficientes en el control de la erosión y escurrimiento superficial con 78 y 65%, respectivamente, en comparación con 66 y 30% de eficiencia de las asociaciones de cultivos de escarda (maíz-frijol y maíz-haba) que con $2,376.7 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y 59.6 mm fueron a la vez más eficientes que los cultivos de escarda únicos (maíz y frijol) los cuales al generar $3,078.5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y

63.5 mm presentaron eficiencias de 43 y 25%, respectivamente, en referencia al suelo desnudo.

De igual forma Solano de la Sala *et al.* (1990) en su estudio realizado en la cuenca de Río Texcoco encontraron que las pérdidas de suelo anual, variaron de acuerdo al uso del suelo y al porcentaje de cobertura vegetal. Estos autores utilizaron dos lotes de escurrimiento para cada tipo de uso del suelo. Así, para los suelos de tepetate con una cobertura vegetal de 33 y 15% obtuvieron una pérdida promedio de $10.96 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, para los lotes de uso agrícola con cobertura variables durante el ciclo de desarrollo vegetativo reportaron pérdidas de suelo de $4.3 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y finalmente en pastizales con cobertura vegetal de 73 y 74% las pérdidas fueron de $0.25 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$.

En este mismo sentido Macias (1992) al utilizar malla mosquitero para simular una cubierta vegetal encontró que se redujeron notablemente las pérdidas de suelo debidas al escurrimiento superficial, lo cual demuestra la bondad de las coberturas en la reducción de la erosión. Este efecto se debe a que la cobertura del suelo protege al mismo contra el impacto y efecto disgregante de las gotas de lluvia que tienen sobre las partículas del suelo, ya que la cobertura disminuye la energía cinética de la lluvia y el escurrimiento superficial se reduce.

En cuanto al efecto de las raíces sobre la erosión hídrica del suelo no existen hasta el momento, trabajos realizados dentro de esta área de estudio.

1.2. Justificación

En el país se siembran mas de 8 millones de ha de maíz, 2 millones de ha de frijol, 33,000 ha de calabacita y 900,000 ha de avena, cultivándose en el Estado de México 603,000 ha de maíz, 15,000 ha de frijol, 1,400 ha de calabacita y 63,000 ha de avena (SIAP, 2007). Por lo que estos cultivos son la base de la economía nacional y de la alimentación del pueblo de México, así como de la producción de forraje para el país y la entidad.

Estos cultivos se siembran en diferentes condiciones del terreno (planicies, laderas, montañas, etc.), lo que propicia que se presenten diferentes tipos de erosión en los terrenos especialmente en las primeras etapas de desarrollo de los cultivos. Por lo anterior, cuantificar la pérdida de suelo y la producción de escurrimiento superficial en los terrenos donde se trabajan los cultivos de escarda (maíz, frijol y calabacita) y el cultivo tupido (avena), es importante para valorar los riesgos que para el suelo representan los mismos, tanto en el ámbito nacional como de la entidad.

Se realizó así este estudio que compara el efecto de la cobertura vegetal y de las raíces de tres cultivos de escarda en la erosión del suelo contra el efecto de la cobertura y las raíces de un cultivo tupido.

El propósito de obtener esta información es que en un futuro permitirá proponer medidas conservacionistas que reduzcan la contribución de estos cultivos a la erosión y mejoren la productividad de los suelos.

2. REVISION DE LITERATURA

2.1. El proceso de la erosión

Morgan (1997) define la erosión del suelo como un proceso de desprendimiento de partículas individuales de la masa del suelo y de transporte por los agentes erosivos, como la lluvia, los escurrimientos superficiales y el viento. Cuando la energía de estos agentes no es suficiente para transportar las partículas, se produce su depositación

La erosión se origina por la agresividad de la lluvia para erosionar (altas precipitaciones con largas duraciones y altas intensidades), la susceptibilidad de los suelos a la remoción y transporte de la partículas por los factores causales (agua y viento), la cual se ve acelerada por la posición de los terrenos como es el grado y longitud de la pendiente. Las actividades humanas pueden acelerar las tasas de erosión; por el excesivo laboreo, el manejo de la cubierta vegetal, el sobrepastoreo, las talas, incendios forestales que inciden en la cubierta vegetal que protege al suelo sobre el proceso erosivo, pero también existen practicas de manejo del suelo y la vegetación que reducen el impacto de los factores erosivos o sea las buenas practicas de manejo de los suelos.

En el mundo agrícola, la agricultura convencional ha provocado un aumento en las tasas de erosión haciendo que estas actividades representen un riesgo para el deterioro ambiental y para la productividad de los terrenos. Por tal razón, en las décadas de 1950 y 1960 para reducir la erosión en España se recomendaba laborear siguiendo las curvas a nivel y sólo era parcialmente efectivo, agravando en algunos casos más el problema (González, 2006). En México en las zonas agrícolas se construyeron sistemas de terrazas de alto costo de construcción y mantenimiento y surcado al contorno para proteger a más de un millón de hectáreas de la erosión y su efecto fue parcial ya que no se tuvo el manejo de las obras realizadas (Martínez ,1999).

En los últimos 40 años, cerca de un tercio de los suelos agrícolas de nuestro planeta han dejado de ser productivos para este uso debido a la erosión, lo que ha repercutido en que más de 10 millones de hectáreas al año presentan problemas de erosión (Pimentel *et al.*, 1995). Los mismos autores mencionan que la intensificación de la agricultura convencional en los últimos 50 años, caracterizada por una mayor mecanización y laboreo del suelo, ha contribuido en gran medida a agravar los procesos erosivos y a favorecer que las zonas altamente erosionadas sean más vulnerables a la desertificación. Sin embargo, debe reconocerse que en este periodo se ha intensificado el uso de prácticas vegetativas donde el manejo de los cultivos de escarda y tupidos y el uso de los residuos de cosecha en los sistemas de labranza de conservación han venido sustituyendo a las prácticas mecánicas y donde se ha reconocido que el uso de cubiertas vegetales y sus productos han sido prácticas más eficientes y económicas para reducir la erosión de los suelos (Hudson, 1980).

2.2. Escurrimiento superficial

El escurrimiento superficial es la proporción de la precipitación que fluye sobre la superficie de la tierra hasta alcanzar un canal, después que el agua de lluvia excede la capacidad de infiltración del suelo (Linsley *et al.*, 1993). En este sentido Figueroa *et al.* (1992), mencionan que este flujo superficial actúa junto con la lluvia en la remoción y transporte de las partículas del suelo ladera abajo. Después de una lluvia fuerte, el efecto de estos dos procesos que se conoce como erosión entre canalillos, puede observarse en la sedimentación de partículas del suelo en abanicos en las áreas de cambio de pendiente. En aquellos lugares donde el escurrimiento y las tasas de pérdida de suelo son altas, el flujo superficial se convierte en el proceso erosivo dominante en las laderas.

Por su parte Morgan (1997), menciona que el escurrimiento superficial se produce en las laderas durante una tormenta cuando se supera la capacidad de almacenamiento en las depresiones de la superficie y cuando, ya sea por una lluvia prolongada o por lluvias de intensidad superior a la capacidad de infiltración del

suelo, se presenta el flujo superficial en pequeñas corrientes que fluyen en forma no uniforme a lo largo de la pendiente

2.3. Cobertura vegetal

La cobertura vegetal se define como la proyección de la porción aérea de la planta sobre la superficie del suelo, y se expresa en porcentaje de dicha proyección (Ferrari *et al.*, 2007). Si bien densidad y frecuencia indican abundancia y distribución de individuos, estos dos parámetros poco o nada dicen del volumen ocupado o superficie de suelo cubierto por una especie, como si lo indica el parámetro de cobertura (Huss *et al.*, 1986).

Asimismo, la cobertura del suelo puede ser representada básicamente por la cobertura vegetal de las plantas en desarrollo (período vegetativo) o por sus residuos. La cobertura del suelo, con plantas en crecimiento, varía de especie a especie, en función de sus características fenológicas y vegetativas (ciclo, hábito de crecimiento, altura, velocidad de cobertura del suelo, estado de crecimiento) y de las prácticas culturales del cultivo (densidad poblacional, espaciamiento de siembra, fertilización y encalado). Los cultivos anuales, por ejemplo, permiten que el suelo quede desprotegido, principalmente en las épocas de preparación del suelo y de la siembra hasta el establecimiento completo del cultivo. El comportamiento de los cultivos perennes es de hecho totalmente distinto al de los cultivos anuales y también diferente entre sí (FAO, 2000).

La vegetación a través de su cobertura ha sido reconocida como un importante medio para proteger al suelo en contra de la erosión (Troeh *et al.*, 1980; Morgan, 1997). Los efectos benéficos del incremento en la cobertura vegetal sobre las pérdidas de suelo es ampliamente documentado (Elwell y Stocking, 1976; Hartwig y Ammon, 2002; Gómez *et al.*, 2004). La cobertura vegetal protege al suelo contra el impacto de las gotas de lluvia, además reduce el poder erosivo del escurrimiento superficial, mientras que las raíces fijan el suelo e incrementan su resistencia contra la capacidad de remoción y transporte del flujo superficial (Elwell y Stocking, 1976;

China *et al.*, 2004; De Baets *et al.*, 2006). Entre otros beneficios se encuentran el incremento del contenido de materia orgánica, mejoramiento de la estructura del suelo, estabilidad de agregados, aumento en la infiltración y la capacidad de retención del agua en el suelo; reducción de la cantidad y velocidad del escurrimiento que se refleja en una menor pérdida del suelo por erosión hídrica (China *et al.*, 2004; Fiener y Auerswald, 2005).

2.3.1. Métodos para medir cobertura vegetal

Un procedimiento muy utilizado por diversos investigadores en México es la combinación de los métodos para medir la cobertura por residuos de cosecha, con una barra-contador, utilizados por Hartwing y Laflen (1978) y transecto sobre una línea reportado por Richards *et al.* (1984) con la variante de miras telescópicas para evaluar coberturas vegetales descrito por Ríos (1987). El método consiste en realizar 100 observaciones del cultivo desde la parte superior y en forma perpendicular a la superficie del suelo, a través de diez cursores colocados en una barra horizontal apoyada sobre un soporte. La cobertura se determina dividiendo el número de cursores en los cuales incide la mira sobre alguna parte de la planta, entre el número total de observaciones.

Otro método es la técnica fotográfica de Elwell y Gardener (1976) que permite obtener un registro continuo, de uno o varios sitios y es adaptable para grandes áreas. Es operado por una sola persona y sin alterar las condiciones del sitio. Las fotografías son obtenidas fácilmente en campo para ser analizadas posteriormente en laboratorio. Este método ha sido utilizado por Sallaway *et al.* (1988) y Greene *et al.* (1994) para evaluar el efecto de la cobertura vegetal sobre el impacto de las gotas de lluvia, el escurrimiento superficial y las pérdidas de suelo.

Behrens y Diepenbrock (2006) usaron imágenes digitales para medir cobertura vegetal en el tiempo, las imágenes se evaluaron automáticamente en un programa de computadora que analiza y separa en canales de color rojo/verde/ azul, cada

píxel. El número de píxeles de color verde se relacionó con el número total de píxeles de la imagen y de esta manera determinaron la cobertura vegetal.

De la misma forma Ferrari *et al.* (2007) diseñaron un programa de computación para la estimación de cobertura vegetal, llamado CobCal Versión 1.0, programado bajo el compilador Visual Basic (Versión 6). Para el cálculo, se utilizan fotografías digitales de la superficie muestral. Las imágenes o fotografías se suben al sistema, utilizando la biblioteca DLL Intel JPEG library. Su funcionamiento está basado en un algoritmo especialmente diseñado para el procesamiento de imágenes digitales. Con el análisis de los tonos de grises o de colores se pueden identificar las áreas con o sin vegetación y determinar un porcentaje de cobertura. La ventaja del método, al igual que el anterior, es que no es destructivo y se puede realizar en diferentes etapas de desarrollo del cultivo.

Otro método es el de cuadrados a campo (método tradicional) descrito por Campbell y Arnold (1973), que a diferencia de los anteriores, resulta operativamente costoso, demanda tiempo agregado y el entrenamiento de los operarios es de vital importancia para obtener buenos resultados.

Existe también el método visual, el cual mediante comparación con parámetros establecidos (Brown, 1954; Morley, *et al.*, 1964), permite estimar en forma ágil los porcentajes de cobertura vegetal. Sin embargo al igual que el método tradicional, necesita de personal bien capacitado, en caso contrario, los errores de estimación pueden ser muy grandes.

2.3.2. La cobertura vegetal y la erosión hídrica del suelo

Cuando los cultivos agrícolas reemplazan a la vegetación natural, cambian las condiciones de protección del suelo. Además, el suelo es normalmente removido y puede ser fácilmente transportado por el escurrimiento superficial (Kosmas *et al.*, 1997). Bajo esta condición ambiental, un cultivo con una cobertura vegetal densa,

bien distribuida sobre el suelo, dispersa el escurrimiento superficial y disminuye su poder erosivo (López *et al.*, 1998; Durán *et al.*, 2004b).

Las cubiertas vegetales en los sistemas agrícolas por sus características de composición (densidad y especie) influyen sobre los procesos hidrológicos y la erosión de los suelos. Estos procesos incluyen infiltración, escurrimiento superficial, evaporación y almacenamiento del agua en el suelo, así como en el desprendimiento, transporte y depositación de las partículas individuales del suelo. El impacto de las gotas de lluvia en el suelo remueve las partículas, sella los poros del suelo, incrementa el escurrimiento y provoca que las partículas removidas sean transportadas por efecto del flujo superficial. En este sentido, el tipo de vegetación y su crecimiento estacional afecta la cantidad de cobertura vegetal y la estructura del dosel, y de manera directa los procesos de escurrimiento superficial y erosión del suelo (Self-Davis *et al.*, 2003).

Self-Davis *et al.* (2003), en su estudio utilizando lluvia simulada, evaluaron el efecto de cinco especies forrajeras (variando la altura de sus coberturas vegetales) sobre el escurrimiento superficial y la infiltración y encontraron que el pasto festuca con cobertura vegetal alta, comparado con las otras especies, fue mas efectivo para reducir los volúmenes de escurrimiento superficial e incrementar la infiltración.

Gutierrez y Hernandez (1996) afirman que el escurrimiento superficial y la erosión en surcos son significativamente afectados por la cantidad, tipo de cobertura y crecimiento estacional de las plantas. Utilizando lluvia simulada midieron las tasas de escurrimiento superficial y de erosión entresurcos dentro de una comunidad de pastos cortos utilizando cinco clases de coberturas de pasto durante las épocas de crecimiento y letargo. Encontraron diferencias en escurrimiento superficial y erosión entresurcos entre clases de cobertura de pasto durante ambas épocas. Los autores señalan que el escurrimiento superficial y la erosión entresurcos fueron afectados en su mayor parte por la cobertura basal de los pastos, cobertura aérea de éstos, materia orgánica, contenido de humedad del suelo, contenido de arena y por el porcentaje de cobertura de rocas y grava.

De igual forma Blackburn *et al.* (1992) y Osuna y Esquivel (1996) señalan que la cantidad y etapa de crecimiento de la vegetación son los más importantes factores que determinan las tasas de escurrimiento superficial y erosión.

Durán *et al.* (2004a) estudiaron las pérdidas de suelo y el escurrimiento superficial bajo tres coberturas vegetales (romero (*Rosmarinus officinalis*), trigo (*Triticum aestivum*) y vegetación espontánea natural) en condiciones de lluvia natural. Estas tres coberturas fueron utilizadas para evaluar su efectividad en reducir el escurrimiento superficial y las pérdidas de suelo. Para el trigo encontraron mas escurrimiento y erosión, del orden de 114.1 a 1.7 mm año⁻¹ y de 14,564.3 a 6.6 kg ha⁻¹ año⁻¹, respectivamente; para el romero, el escurrimiento varió de 7.9 a 1.3 mm año⁻¹ y la erosión de 156.4 a 2.3 kg ha⁻¹ año⁻¹, mientras que para la vegetación espontánea, el escurrimiento varió de 4.4 a 0.9 mm año⁻¹ y la erosión de 322.3 a 2.2 kg ha⁻¹ año⁻¹ para el periodo de estudio. Los resultados indican que la cobertura vegetal del romero y la vegetación espontánea reducen las pérdidas de suelo en 99 y 98%, y el escurrimiento en 94 y 96% respectivamente respecto al trigo.

De la misma forma Sánchez *et al.* (2002) cuantificaron las pérdidas de suelo usando lotes de escurrimiento, sobre áreas cubiertas con cuatro tipos de vegetación, incluyendo ambientes naturales y cultivados. La tasa más alta de erosión correspondió a los cultivos hortícolas en rotación, con 15 t ha⁻¹ año⁻¹; para los lotes con árboles de manzana (*Malus sylvestris* Millar), las pérdidas de suelo fueron 1.47 t ha⁻¹ año⁻¹; para pasto (*Pennisetum clandestinum* Hochst. Ex Chiov.), sin pastoreo fueron de 0.27 t ha⁻¹ año⁻¹ y para los lotes de bosque natural fueron igual a 0.43 t ha⁻¹ año⁻¹. Esto confirma nuevamente que a medida que el tipo de vegetación tiene mayor cobertura vegetal se reducen las pérdidas de suelo.

Quinton *et al.* (1997) estudiaron la influencia de la cobertura vegetal aérea, de la biomasa de la hojarasca, de la altura de las plantas, de la ubicación de la planta en la parcela, de la resistencia al esfuerzo cortante a saturación, del porcentaje de pedregosidad y del contenido de humedad al inicio de la simulación, de diferentes especies de vegetación sobre la generación de escurrimiento superficial y la erosión

del suelo bajo lluvia simulada. Solo la cobertura vegetal mostró una relación significativa entre las pérdidas de suelo y el escurrimiento superficial, cuando las coberturas vegetales fueron mayores a 30%. Lo que confirma que la cobertura vegetal ejerce una influencia clara sobre el escurrimiento superficial y la pérdida de suelo.

Por su parte, Greene *et al.* (1994), estudiaron las relaciones entre la cobertura de las plantas y su exposición al pastoreo sobre el escurrimiento y la erosión en un suelo rojo, sobre un matorral en un lugar semiárido de Australia oriental. Las mediciones fueron hechas sobre potreros experimentales pequeños bajo pastoreo, con proporciones diferentes de ovejas y canguros. Se simuló lluvia a una intensidad promedio de 30 mm h⁻¹. Hubo una relación negativa significativa ($r^2 = 0.58$; $P < 0.01$) entre la tasa final de escurrimiento y la cobertura vegetal. Las plantas incrementaron la infiltración y redujeron el escurrimiento superficial. No se reportó un efecto significativo de la cobertura vegetal sobre la concentración de sedimentos.

Varios autores han trabajado con lluvia simulada y natural, para evaluar la producción de sedimentos en diferentes usos y coberturas del suelo. Entre éstos están Alcalá *et al.* (1998), quienes, mediante lluvia simulada, evaluaron la producción de sedimentos en tres tipos de uso del suelo. Estos autores eligieron cuatro lotes de escurrimiento: dos agrícolas, uno de pastizal y uno de tepetate (suelo desnudo), con dimensiones de 7 m². La mayor producción total de sedimentos se reportó para el suelo desnudo con 6.3 t ha⁻¹ y con los cultivos agrícolas fue de 2.91 y 0.73 t ha⁻¹, lo que indica que el factor de protección de los cultivos agrícolas (C de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS)) fue de 0.46 y 0.11 que significa que existe una eficiencia de la eficiencia cubierta vegetal de los cultivos agrícolas de 54% y 89% para reducir la erosión del suelo.

Por su parte, Obando (2000) trabajó con lotes de escurrimiento de 50 m² bajo condiciones naturales de lluvia, las pérdidas de suelo fueron las siguientes: lote de suelo desnudo, 150 t ha⁻¹ año⁻¹; lote con cobertura con malla a 33%, 100 t ha⁻¹ año⁻¹; lote con cobertura con malla a 45%, 50 t ha⁻¹ año⁻¹, lote con cobertura de dos mallas

superpuestas 33% + 45%, 25 t ha⁻¹ año⁻¹; lote con cobertura por pasto *Brachiaria*, 10 t ha⁻¹ año⁻¹; y, finalmente, un lote con cultivos anuales de arroz-soya-pastos, 40 t ha⁻¹ año⁻¹. Esto indica que la eficiencia para reducir la erosión de la malla de alambre de 33% fue de 34% y para la malla de 45% fue del 67%, para las dos mallas superpuestas 33% + 45% fue de 84%, para pasto del 94% y para cultivos anuales de 74%, lo que indica el efecto de la cobertura del suelo para reducir la erosión

Asimismo, Návar (2000), al estudiar cuatro usos del suelo (matorral, pastizal, agrícola y plantación forestal) en lotes de escurrimiento de 20 m², bajo condiciones de lluvia natural, encontró pérdidas de suelo de 190.4 kg ha⁻¹ año⁻¹ para matorral; 800.5 kg ha⁻¹ año⁻¹ para una plantación forestal; 7,859 kg ha⁻¹ año⁻¹ para un cultivo agrícola y 781.9 kg ha⁻¹ año⁻¹ para un pastizal. Esto comprueba que son los cultivos agrícolas los que reportan las mayores pérdidas de suelo. Loch (2000) estudio el efecto de la lluvia simulada sobre dos lotes de escurrimiento, con cobertura vegetal (pasto rhodes (*Chloris gayana*) y pasto kikuyo (*Pennisetum clandestinum*)) y dos lotes de suelo desnudo, encontró que en los lotes con cobertura vegetal las pérdidas de suelo fueron 0.1 y 0.01 t ha⁻¹, respectivamente, en comparación con 30 y 35 t ha⁻¹, de los lotes de suelo desnudo. De esta información se desprende que el pasto rhodes y kikuyo tienen una eficiencia cercana al 100% para reducir la erosión del suelo, de ahí la importancia de la cobertura vegetal en el tiempo.

2.4 Raíces

La raíz se define como la parte subterránea de la planta que tiene como funciones principales la absorción de agua y sustancias disueltas en la misma y su conducción hacia las partes aéreas, además exceptuando las raíces aéreas y las de las plantas acuáticas flotantes, las raíces de los demás vegetales son los órganos encargados de fijar a las plantas en el suelo. Las raíces pequeñas y extendidas penetran poco en el terreno, por lo que las plantas que las poseen son derribadas a menudo por los vientos fuertes. Las raíces grandes, con eje primario muy

desarrollado, penetran profundamente en los suelos y arraigan a las plantas de manera muy firme (Ruiz *et al.*, 1983).

2.4.1. Métodos de estudio de las raíces

Muchos métodos de estudio (Rowse and Phillips, 1974; Richards *et al.*, 1979; Zoon y Van Tienderen, 1990) se han propuesto para estimar longitud de raíz, la mayoría basados en el método de línea-intersección primeramente desarrollado por Newman (1966) y modificado por Marsh (1971) y Tennant (1975). El método es de fácil aplicación, preciso, pero que consume mucho tiempo. De acuerdo a Böhm (1979), actualmente existen los métodos clasificados como: directos, indirectos y de recipientes, describiéndolos bajo los nombres: de excavación, de monolito, de barrena, de perfiles, de pared de vidrio y de recipiente, entre otros.

Con el tiempo se han diseñado métodos electrónicos clasificados como: a) de video cámara (Ottman y Timm, 1984; Cunningham *et al.*, 1989; Murphy y Smucker, 1995) o b) de escáner óptico (Dowdy *et al.*, 1995; Arsenault *et al.*, 1995; Kaspar y Ewing, 1997; Kimura *et al.*, 1999). Según Costa *et al.* (2000) y Kimura y Yamasaki (2001) estos métodos han resultado ser más precisos, ya que reducen los errores que el ojo humano puede cometer al medir las características de las raíces.

Otro método electrónico para la evaluación del crecimiento y longitud de la raíz es el minirizotróf, con el que se puede hacer una evaluación cuantitativa del nivel de ramificación de los sistemas radicales de la planta mediante la video-grabación de una muestra de raíces interceptadas por este dispositivo enterrado en el campo. Con este método se pueden analizar diversos parámetros morfológicos mediante un procesador de imágenes computarizado (Smucker, 1992).

El método del rizotróf se puede emplear para estudiar a detalle los sistemas radicales en investigaciones de ecología y fisiología (Manske, 2001). Por medio de este método, la estimación del crecimiento y longitud de la raíz puede realizarse en

forma visual y periódicamente. Los rizotrones pueden ser más ventajosos porque el volumen de suelo ocupado por las raíces puede ser controlado (Taylor, 1986).

Pavlychenko (1937) midiendo la longitud del sistema radical, para avena silvestre encontró 0.388 km, trigo variedad "Marques" 0.259 km, centeno 0.337 km y para avena variedad "Hannchen" 0.405 km. Por otra parte, Henriksen *et al.* (2002), en su estudio con frijol común, encontraron una densidad longitudinal de raíces de 1.43 cm cm⁻³. Qin *et al.* (2004) obtuvieron una densidad longitudinal de raíces para trigo de 23.32 cm cm⁻³ en los primeros 10 cm de profundidad del suelo. Por su parte Lipiec *et al.* (1991) encontraron para cebada una densidad longitudinal de raíces de 5.64 cm cm⁻³ en los primeros 10 cm de profundidad de un suelo arcilloso.

Para el cultivo de maíz, Majdi *et al.* (1992), encontraron una densidad longitudinal de raíces de 4.0 cm cm⁻³ para una capa de 7.5 cm de suelo, Tardieu (1988) encontró una densidad longitudinal de raíces de 0.85 cm cm⁻³ en una capa de suelo de 20 cm de profundidad, Bui y Box (1993), encontraron densidades longitudinales de raíces mayores a 4.0 cm cm⁻³ en los primeros 10 cm de profundidad de un suelo arcillo limoso. Esto indica que existe una gran variación en la densidad longitudinal de las raíces de maíces originada por la profundidad de la capa considerada y que también podría ser afectada por el tipo de suelo, el germoplasma y el manejo del cultivo utilizado.

Núñez y Bisbal (1999) estudiaron el efecto de la compactación del suelo sobre la densidad longitudinal de raíces de maíz. Para ello utilizaron suelos con distinta densidad aparente, encontrando una densidad longitudinal de raíces promedio de 0.75 cm cm⁻³ a los 30 días después de la germinación. Ball-Coelho *et al.* (1998) estudiaron el efecto de la no labranza y la labranza en un suelo de textura gruesa, sobre la densidad longitudinal de raíces de maíz, encontraron 17 y 7 km m⁻³, respectivamente. Durieux *et al.* (1994), estudiaron el efecto de la fertilización nitrogenada sobre la distribución de las raíces de maíz. Utilizaron tres híbridos y encontraron un promedio de 1,302, 2,238 y 1,184 m planta⁻¹, respectivamente.

2.4.2. Morfología y funcionalidad de las raíces

Se han desarrollado diferentes clasificaciones para sistemas radicales. Con frecuencia las clasificaciones dependen del tamaño y del número de raíces individuales o bien de su origen como por ejemplo, raíces fibrosas o fasciculadas, raíces de almacenamiento, raíces pivotantes o típicas (Cannon, 1949; Fuller *et al.*, 1974; Ruiz *et al.*, 1983; Guerrero-Campo y Fitter, 2001).

Las raíces también pueden clasificarse en función a su origen a partir de otras raíces, las que son llamadas laterales secundarias, terciarias, cuaternarias, etc. (Waisel *et al.*, 1996). Mucha de la variación en tamaño y forma de raíz puede ser explicada por la respuesta fenotípica al ambiente, además el patrón de tamaño de raíz está relacionado a la forma de vida, la estrategia ecológica de las plantas y al tamaño de semilla (Guerrero-Campo y Fitter, 2001). Adicionalmente, el crecimiento de la raíz también es influenciado por una combinación de diferentes factores externos: biológicos, químicos, hidrológicos, microclimáticos y físicos (Gyssels *et al.*, 2005).

2.4.3. Las raíces y las propiedades que controlan la erosionabilidad del suelo

La erosionabilidad de un suelo es definida como la susceptibilidad del mismo a situaciones de desprendimiento y transporte de sus partículas por los agentes causales. La erosionabilidad del suelo es inversamente proporcional a la resistencia del suelo a la erosión y esta afectada por las propiedades intrínsecas del suelo tales como estabilidad de agregados, capacidad de infiltración, densidad aparente, textura, contenido de materia orgánica, composición química y resistencia al esfuerzo cortante. Todas estas propiedades pueden ser modificadas por el sistema radical de las plantas.

Observaciones de campo realizadas en el sureste de Asia por Turkelboom *et al.* (1997) muestran que las pérdidas de suelo en campos recién preparados son generalmente muy pequeñas en el primer año después del aclareo, debido a que las raíces de la vegetación forman agregados estables y estas se incrementan con el

paso del tiempo ya que los sistemas de labranza destruyen las raíces lo cual reduce la proporción de agregados estables en el suelo. El efecto de las raíces vivas sobre la estabilidad estructural del suelo depende de la especie de las plantas. Las plantas monocotiledóneas son superiores a las dicotiledóneas y los pastos son mejores que los cereales en estabilizar agregados, porque los primeros contienen una gran biomasa de raíces con exudados (Glinski y Lipiec, 1990; Amezketa, 1999). Las raíces de las plantas incrementan significativamente la estabilidad estructural de los suelos, y de esa manera se disminuye la susceptibilidad de los suelos a la erosión (Li *et al.*, 1992; Zhou y Shangguan, 2005).

Las raíces de las plantas penetran en los macroporos del suelo mejorando el movimiento del agua y la difusión de los gases. Ellos contribuyen a crear un sistema continuo de poros en el suelo, que favorecen la infiltración del agua sobre éste (Glinski y Lipiec, 1990).

El estudio realizado por Li *et al.* (1992) indica que la infiltración del agua en el suelo se incrementa porque las raíces de las plantas mejoran los macroporos del suelo y promueven la formación de agregados estables en el agua de 2 a 5 mm y > 5 mm en diámetro. Por lo tanto una alta capacidad de infiltración, reduce el volumen de escurrimiento superficial y consecuentemente la erosión del suelo.

Las raíces en crecimiento en el suelo ocupan el espacio que estuvo previamente ocupado por el espacio poroso y partículas del suelo. Dado que el diámetro de raíz es usualmente más grande que el diámetro de poros, las partículas de suelo son desplazadas hacia los lados y la densidad aparente del suelo aumenta en la zona aledaña donde crece la raíz (Glinski y Lipiec, 1990). Las raíces finas menores a 1 mm de diámetro pueden disminuir significativamente la densidad aparente e incrementar la porosidad del suelo, aumentando de esta manera la capacidad de infiltración, disminuyendo el escurrimiento superficial y así la erosión del suelo (Li *et al.*, 1992).

La textura, el contenido de materia orgánica y la composición química de un suelo son importantes porque tienen influencia sobre la estabilidad de agregados

(Morgan, 1997). Esta estabilidad se logra gracias a residuos de materia orgánica de las raíces descompuestas que soportan una gran población microbiana en la rizósfera y proveen de alimentos a los animales del suelo (Tisdall y Oades, 1982; Amezketa, 1999).

2.4.4. Raíces y la erosión hídrica del suelo

Gyssels *et al.* (2002) señalan que la importancia de la cobertura vegetal para reducir las tasas de erosión del suelo ha sido extensamente discutida en literatura, sin embargo el efecto de la biomasa de raíces para reducir las tasas de erosión del suelo ha sido poco estudiada, a pesar de que la densidad de raíz en la capa superficial del suelo incrementa su cohesión y puede por lo tanto reducir el proceso de erosión ya que retiene al suelo en su lugar en contra de la capacidad de remoción y de transporte del flujo concentrado en campos con escasa cobertura (Tengbeh, 1993; Li *et al.*, 1991).

En estudios realizados por Ghidey y Alberts (1997) encontraron que la masa de raíces muertas de alfalfa, pasto azul, maíz y soya no tiene influencia sobre la erosión por salpicado en un suelo arcillo-limoso en su experimento con lluvia simulada, aunque encontraron que las raíces tenían un efecto significativo sobre la estabilidad de agregados. Las raíces pudieron estabilizar los agregados del suelo, pero esos no fueron lo suficientemente consistentes para resistir el impacto de las gotas de lluvia.

Bui y Box (1993) estudiaron el efecto de diferentes densidades de longitud radical de maíz en la erosión entresurcos de un suelo arcillo-arenoso en diferentes etapas de crecimiento de la planta. En lotes de escurrimiento con plantas de maíz y con plantas de maíz cortadas en la base del tallo, aplicaron lluvia simulada y colectaron el escurrimiento y el sedimento, encontrando que la cobertura vegetal por follaje del maíz ofrece mayor protección contra la erosión entresurcos que sus raíces, y que incluso altas densidades de raíces vivas de maíz ($>4.0 \text{ cm cm}^{-3}$), no tienen un efecto estabilizador contra la erosión entresurcos del suelo.

Por su parte Ghidry y Alberts (1997) encontraron diferencias significativas en la erosionabilidad del suelo entresurcos para un suelo arcillo-limoso permeable en su experimento de laboratorio con lluvia simulada. Usaron suelo de la capa arable con raíces muertas de alfalfa, pasto azul, maíz y soya. Los parámetros de erosionabilidad entresurcos, concentración de sedimento y volumen de escurrimiento de cultivos perennes fueron significativamente mas bajos que los de cultivos de hilera, pero las diferencias en los valores de erosión entresurcos entre los cultivos fueron pequeñas comparadas a las diferencias en masa y longitud de raíz.

Mamo y Bubenzer (2001a; 2001b) realizaron un estudio combinando experimentos de laboratorio en un canal de flujo hidráulico y estudios de campo creando un canal artificial para determinar la influencia de las raíces vivas de las plantas sobre la tasa de desprendimiento del suelo bajo condiciones de flujo concentrado. Utilizaron centeno para el laboratorio y maíz y soya en el campo sobre un suelo arcillo-limoso. Para cada cultivo, la erosionabilidad en surcos y las tasas de desprendimiento de suelo disminuyeron exponencialmente con la densidad longitudinal de raíces, pero el centeno experimentó más desprendimiento de suelo a baja densidad longitudinal de raíces que los otros dos cultivos a la misma densidad longitudinal de raíces.

Mediciones de campo de flujo concentrado en una sección transversal de un canal con diferentes densidades de raíces de cereales y pastos en la faja fértil de Bélgica Central (Gyssels y Poesen, 2003) indicaron que la erosión en surcos y en cárcavas decrecía exponencialmente con el incremento de la densidad de raíces, en una forma muy similar a como lo hace la cobertura vegetal. Estos autores señalan que existe una reducción exponencial de la erosión del suelo a medida que existe una mayor proporción de raíces y del efecto combinado de raíces y brotes de las plantas.

Gyssels *et al.* (2002) encontraron que el aumento en la densidad de siembra de granos pequeños como el trigo, cuando se siembran en zonas donde se concentra el flujo superficial, reducen la erosión del suelo debido a que se aumenta

significativamente la densidad de raíz de los cultivos, lo que incrementa la cohesión y la retención del suelo por las propias raíces. Este efecto se nota principalmente en las primeras etapas de crecimiento del cultivo y se considera que las raíces previenen la formación de cárcavas y la erosión en surcos.

Schenk y Jackson (2002) estudiaron la variabilidad de la profundidad de las raíces en una escala global. Los patrones de las raíces a diferentes profundidades son condicionados por factores climáticos y por su tipo de vida (bosques, praderas, etc.). Datos reportados por Martínez-Fernández *et al.* (1995) también indican que el tipo de uso del suelo controla las propiedades de las raíces. Sus hallazgos tienen algunas implicaciones sobre las tasa de erosión del suelo. La densidad de raíces es alta en la capa superficial del suelo y decrece exponencialmente con la profundidad del suelo, por lo tanto es de esperarse que las raíces de las plantas tengan un gran efecto sobre la resistencia de la capa superficial del suelo a la erosión.

El efecto de las raíces de especies con poca profundidad radical pero con una densa red de raíces (ejemplo, praderas) sobre la resistencia a la erosión del suelo por la concentración del flujo superficial, es mayor que la protección del suelo de las especies con raíces profundas (ejemplo, bosque caducifolio). Desde el punto de vista de la erosión, los pastos por su sistema radical superficial, representan la mejor opción para proteger a los suelos de la erosión, seguidos de los arbustos y de los árboles, que cuentan con raíces mas profundas (Schenk y Jackson, 2002).

Las raíces de las plantas aumentan el esfuerzo cortante del suelo haciéndolo menos susceptible a ser erosionado, sin embargo las relaciones entre la cohesión del suelo (esfuerzo cortante) y los parámetros de las raíces no están aun bien entendidos. Se encontró una relación lineal positiva entre el incremento en la cohesión del suelo y el cociente raíz-área por Waldron (1977) en un suelo arcilloso, y por Ziemer (1981) entre la resistencia al esfuerzo cortante y la biomasa de raíces de *Pinus cordata* en un suelo arenoso. También Tengbeh (1993) encontró que el pasto Loretta (*Lolium perenne*) incrementó la cohesión del suelo (kPa), como función de la densidad de raíz (kg m^{-3}) en forma lineal. Los datos de su experimento claramente

muestran que el efecto de las raíces en la cohesión del suelo está condicionado fuertemente por el contenido de humedad y la textura del suelo.

2.5. Simuladores de lluvia

La simulación de lluvia es la técnica de aplicar agua a parcelas experimentales de una manera similar a la precipitación natural. Las ventajas de simular la lluvia tienen que ver con: 1) el bajo costo por unidad de información colectada, comparado con los costos de experimentos bajo condiciones de precipitación naturales y 2) se tiene un control absoluto en términos de dónde y cuándo se colectará la información, las condiciones de las parcelas a ser estudiadas, y dentro de las características de diseño, las tasas y cantidades de lluvia a ser aplicadas. Consecuentemente, el grado de control que se tiene sobre los simuladores de lluvia, permite la colección de información de calidad en tiempos relativamente cortos (Sánchez *et al.*, 1999; FAO, 1997).

Los simuladores de lluvia ya sean de tipo aspersor o formadores de gota tienen en común: ser portátiles, tener fuente de energía y agua, lo que permite disponer de cantidades de precipitación cuando y donde se necesite; tener un mecanismo de rociado con el cual variando los grados de control pueden abastecer diferentes intensidades y cantidades de precipitación; así como contar con mecanismos y/o procedimientos para la medición en las salidas de las parcelas (Gross *et al.*, 1991; Sánchez *et al.*, 1999).

La elección de un determinado tipo de simulador depende de parámetros de la precipitación como tamaño de gota, velocidad de impacto, intensidad de los eventos a simular, así como de los objetivos del proyecto (Sánchez *et al.*, 1999).

2.6. Conclusión de la revisión de literatura

La revisión de literatura muestra que los suelos donde la vegetación natural es sustituida por cultivos agrícolas tienden a presentar mayores pérdidas de suelo por erosión hídrica. Esto ha llevado a muchos investigadores a cuantificar este tipo de erosión en algunos cultivos. Algunos de estos trabajos se han hecho bajo condiciones de lluvia natural y otros bajo condiciones de lluvia artificial. Pese a que no hay una tendencia marcada, hay cierta preferencia en cuanto a utilizar lluvia artificial puesto que permite un mejor control de las condiciones experimentales.

Es notorio que ha habido un enfoque reduccionista en la investigación sobre el efecto de los cultivos en la erosión hídrica, pues se ha considerado el efecto de los cultivos sobre la erosión como efecto únicamente de su cobertura vegetal. La planta, en su estructura orgánica no solo está compuesta de su follaje sino también de sus raíces, de modo que cuando se habla de la cobertura vegetal, se estaría hablando del sistema planta que incluye cobertura vegetal y raíces. Pese a que esto parece ser evidente la mayoría de investigaciones en México se han enfocado a estudiar el efecto de la cobertura vegetal y no se encuentran estudios que muestren el papel que juegan las raíces en el proceso erosivo.

La mayoría de trabajos que han evaluado la cobertura vegetal relacionada con la pérdida de suelo, han sido mayoritariamente en pastos, arbustos, zacatonales y en bosques. En cambio los trabajos con cultivos agrícolas han sido pocos y casi siempre utilizando maíz, frijol y avena. Por su parte los trabajos que han evaluado raíces y pérdida de suelo lo han hecho principalmente con gramíneas y pastos, y estos han sido principalmente fuera de México, no existiendo en nuestro país registro alguno de trabajos que hayan evaluado el efecto de las raíces en la erosión del suelo.

Por otra parte, las principales técnicas que se han venido usando para medir cobertura vegetal son: la técnica de cuadros a campo, la visual y la de barra-contador combinada con la de transecto sobre una línea con miras telescópicas. Pero estas son técnicas poco precisas a comparación de la técnica de la fotografía digital, la

cual es una técnica novedosa y muy precisa que consiste en evaluar imágenes automáticamente en un programa de computadora que analiza y separa en canales de color rojo/verde/ azul, cada píxel. El número de píxeles de color verde se relaciona con el número total de píxeles de la imagen y de esta manera se determina la cobertura vegetal.

En cuanto al efecto de las raíces sobre la pérdida de suelo, las investigaciones hechas en otras partes del mundo muestran cierto desacuerdo en cuanto a la variable que mejor evalúa el efecto de esta sobre la erosión, algunos investigadores utilizan la DLR (Densidad longitudinal de raíces, expresada en km m^{-3}), que representa la longitud total de raíces del cultivo desarrolladas en un metro cúbico de suelo, mientras otros investigadores utilizan la DR (Densidad de raíces, expresada en kg m^{-3}), la cual representa el peso total seco de las raíces vivas del cultivo desarrolladas en un metro cúbico. Parece ser que la DLR es la mejor variable para evaluar el efecto de las raíces sobre la erosión debido a que proporciona una idea de la distribución de las raíces dentro del suelo, mientras que la DR solo indica la cantidad de biomasa de raíces presentes en el suelo.

3. OBJETIVOS, HIPÓTESIS Y SUPUESTOS

3.1. Objetivos

1. Evaluar el efecto integral de la cobertura vegetal y de las raíces de los cultivos maíz, frijol, calabacita y avena sobre el escurrimiento superficial y la pérdida de suelo.

2. Evaluar la contribución aislada de las raíces, cuando la cobertura vegetal aérea de los cultivos ha sido eliminada, sobre el escurrimiento superficial y la pérdida de suelo.

3.2. Hipótesis

1. Con coberturas vegetales de maíz, frijol, calabacita y avena, la pérdida de suelo causada por el escurrimiento superficial se comporta de forma similar.

2. El sistema radical no resulta ser tan eficiente en la reducción de la pérdida de suelo como lo es la cobertura vegetal más las raíces.

3.3. Supuestos

La capa de 0 a 10 cm de suelo es suficiente para establecer la relación raíces pérdida de suelo, ya que en ésta ocurre el proceso erosivo.

El simulador de lluvias tipo Purdue reproduce artificialmente las condiciones de lluvia natural de una manera aceptable.

El conjunto de métodos utilizados en este estudio son adecuados para validar las hipótesis planteadas.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Descripción del área de estudio

4.1.1. Localización

El estudio se realizó durante el 2006 dentro del campo experimental “Lomas de San Juan”, de la Universidad Autónoma Chapingo, a 5 km sobre la carretera Chapingo-Tequexquihuac, localizado en la región oriental de la Cuenca del Valle de México, a una altitud aproximada de 2,300 msnm. Geográficamente ubicado a $19^{\circ} 29' 52.21''$ de latitud norte y $98^{\circ} 51' 08.95''$ de longitud oeste del meridiano de Greenwich (Figura 1).

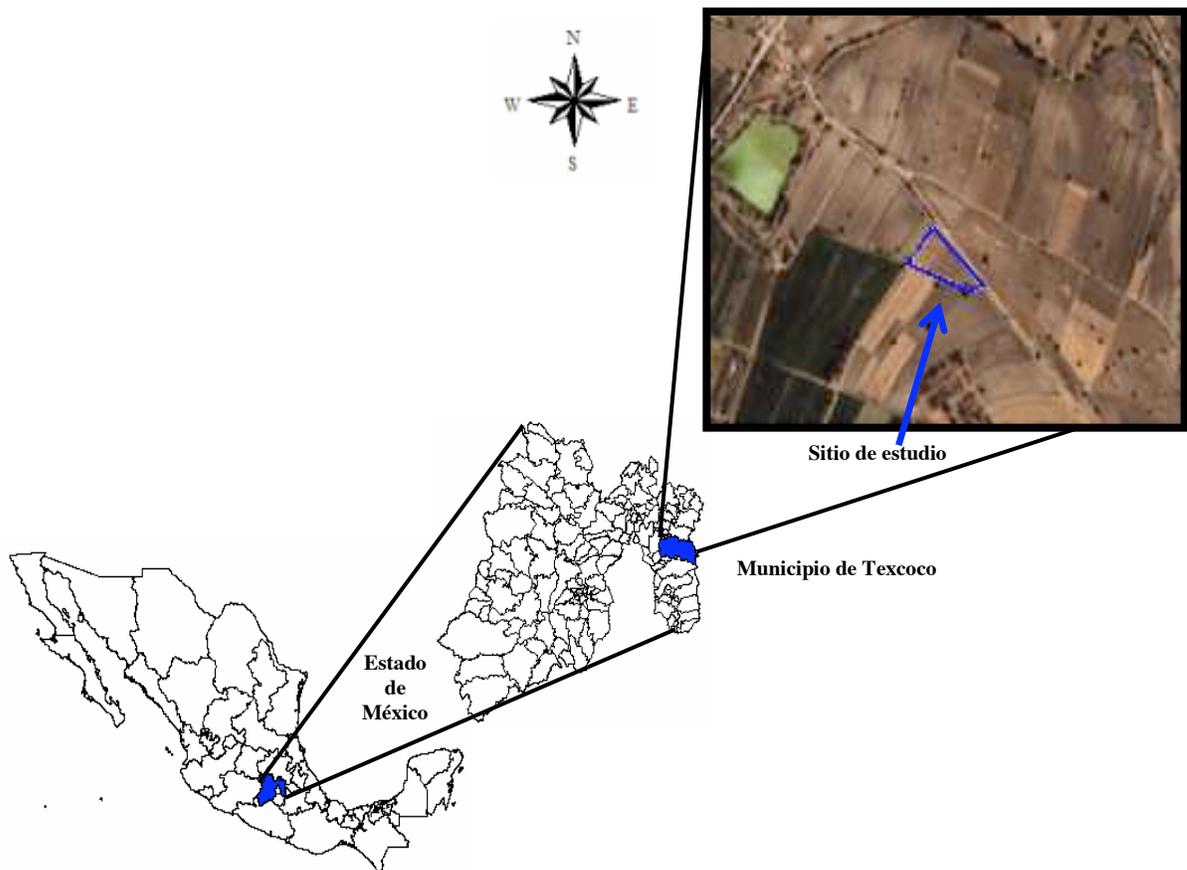


Figura 1. Localización de área de estudio. “Lomas de San Juan”, Chapingo, Edo. de México.

4.1.2. Clima

La variación de la temperatura, precipitación y evaporación (medias mensuales), reportada por la estación climatológica de la Universidad Autónoma Chapingo para un periodo de 20 años, permiten definir un climograma que indica que existen seis meses húmedos en el verano y el resto son secos (Figura 2).

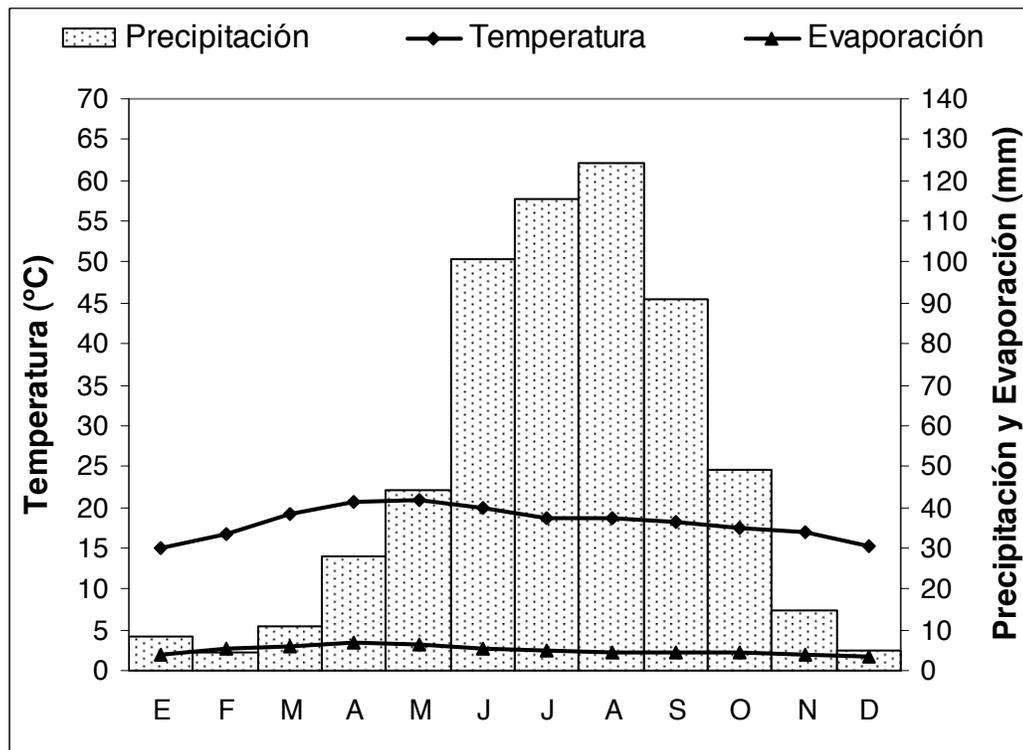


Figura 2. Climograma de la zona de estudio.

La precipitación media anual es de 596.4 mm, las precipitaciones son abundantes en verano y escasas el resto de los meses, el mes de mínima precipitación es febrero con 4.3 mm, mientras que el mes mas lluvioso es agosto con 124.3 mm. La temperatura media anual es 18°C, siendo las temperaturas suaves todo el año, con una oscilación térmica de $\pm 3^{\circ}\text{C}$. Enero presenta la temperatura mas baja con 15.1°C y mayo la más alta con 21°C. La evaporación media anual es de 58.8 mm, el mes donde se presenta mayor evaporación es abril con 6.7 mm, y el

mes con menor evaporación es diciembre con 3.7 mm. Teniendo en cuenta todo esto se puede decir que el clima de esta zona es templado semi-árido.

4.1.3. Suelo

De acuerdo con Cachón *et al.* (1976), el suelo corresponde al subgrupo lithic ustorthent, grupo ustorthent, suborden orthent y orden de los entisoles de acuerdo con sistema de clasificación de la 7ª aproximación de los E.U.A. La micromorfología indica que los minerales que predominan son el cuarzo, vidrio volcánico, plagioclasa y micas como la moscovita y biotita (Zazueta, 1984).

El suelo es somero con profundidad de 25 a 40 cm, con textura migajón arenosa y un pH de 7.25. Su estructura está débilmente desarrollada. Su baja fertilidad natural está asociada a la poca capacidad de retención de humedad, al bajo contenido de materia orgánica y la presencia de una capa impermeable de tepetate cerca de la superficie. La pendiente natural del terreno es suave, de alrededor de 2% (Macías, 1992).

4.2. Diseño de tratamientos

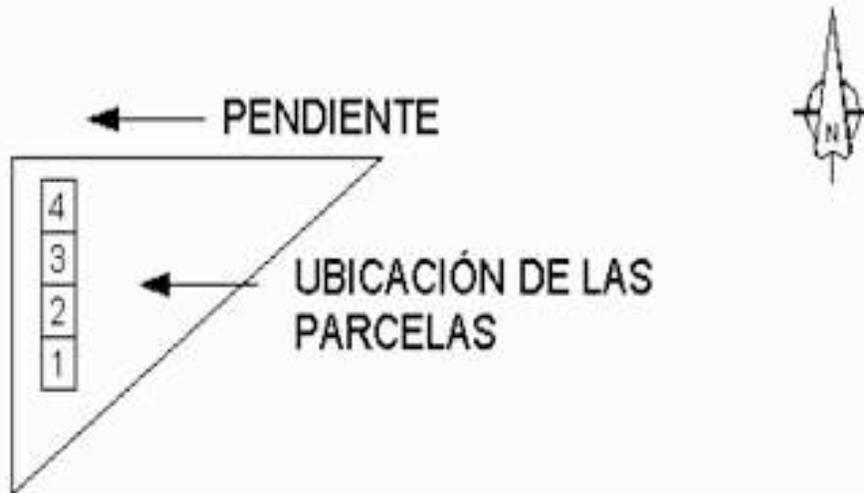
Los tratamientos fueron definidos con base al cultivo y a la modalidad de cobertura. Se utilizaron cuatro cultivos: maíz, frijol, calabacita y avena y dos modalidades de cobertura: con cobertura vegetal y sin cobertura (raíces), cuyas combinaciones dieron lugar a ocho tratamientos, como se describen en el Cuadro 1. A cada tratamiento se aplicó lluvia simulada en cuatro fechas distintas (15, 30, 50 y 65 días de desarrollo) como aparece en el Cuadro 1. La última simulación a los 65 días de desarrollo obedeció a que uno de los cultivos estaba terminando su ciclo de desarrollo y las simulaciones a cada 15 días se definieron para tener diferencias en la cobertura vegetal (%) y en las raíces (DLR) de cada cultivo

Cuadro 1. Descripción de los tratamientos evaluados.

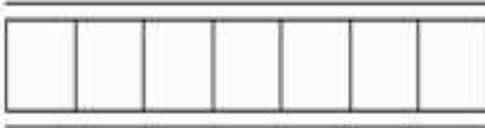
| Número | Tratamiento | Descripción |
|---------------|-----------------------|---|
| 1 | Maíz C+R | Subparcela de maíz donde se evaluó la cobertura vegetal (C) más las raíces (R), aplicando lluvia simulada a los 15, 30, 50 y 65 días de desarrollo después de la siembra. |
| 2 | Maíz R | Subparcela de maíz donde se eliminó la cobertura vegetal (C) y se evaluaron las raíces (R), aplicando lluvia simulada a los 15, 30, 50 y 65 días de desarrollo después de la siembra. |
| 3 | Frijol C+R | Subparcela de frijol donde se evaluó la cobertura vegetal (C) más las raíces (R), aplicando lluvia simulada a los 15, 30, 50 y 65 días de desarrollo después de la siembra. |
| 4 | Frijol R | Subparcela de frijol donde se eliminó la cobertura vegetal (C) y se evaluaron las raíces (R), aplicando lluvia simulada a los 15, 30, 50 y 65 días de desarrollo después de la siembra. |
| 5 | Calabacita C+R | Subparcela de calabacita donde se evaluó la cobertura vegetal (C) más las raíces (R), aplicando lluvia simulada a los 15, 30, 50 y 65 días de desarrollo después de la siembra. |
| 6 | Calabacita R | Subparcela de calabacita donde se eliminó la cobertura vegetal (C) y se evaluaron las raíces (R), aplicando lluvia simulada a los 15, 30, 50 y 65 días de desarrollo después de la siembra. |
| 7 | Avena C+R | Subparcela de avena donde se evaluó la cobertura vegetal (C) más las raíces (R), aplicando lluvia simulada a los 15, 30, 50 y 65 días de desarrollo después de la siembra. |
| 8 | Avena R | Subparcela de avena donde se eliminó la cobertura vegetal (C) y se evaluaron las raíces (R), aplicando lluvia simulada a los 15, 30, 50 y 65 días de desarrollo después de la siembra. |

El área experimental fue de 39.2 m², dividida en 4 parcelas de 9.8 m², a la vez subdivididas en 7 subparcelas de 1 m², utilizadas como unidad experimental, de las cuales se utilizaron 5 subparcelas, mismas que representaron el área útil de estudio para los tratamientos, las otras 2 subparcelas se dejaron para reposición en caso de algún incidente. En cada parcela se dejaron 2.8 metros como bordo (Figura 3). La pendiente natural del terreno se modificó para tener parcelas con pendiente de 10%.

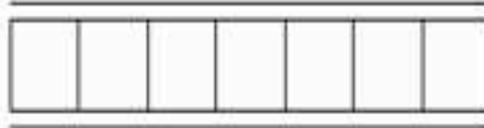
PARCELA EXPERIMENTAL



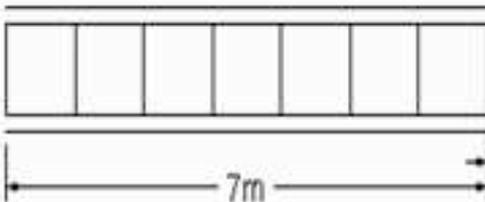
(1) PARCELA MAIZ 7 m²



(2) PARCELA FRIJOL 7 m²



(3) PARCELA CALABACITA 7 m²



(4) PARCELA AVENA 7 m²



Figura 3. Diseño y localización de las parcelas bajo estudio.

4.3. Descripción de los cultivos utilizados

4.3.1. Cultivo de maíz

El maíz, *Zea mays* L., es una especie monocotiledónea anual, perteneciente a la familia de las poáceas (gramíneas). Es una especie monoica, lo que significa que sus inflorescencias, masculina y femenina, se ubican separadas dentro de una misma planta; esto determina además que su polinización sea fundamentalmente cruzada. Del maíz se obtienen numerosos productos y se utiliza tanto en alimentación humana como animal. En la Figura 4 se pueden observar las etapas de germinación, crecimiento vegetativo y la etapa de reproducción del maíz.

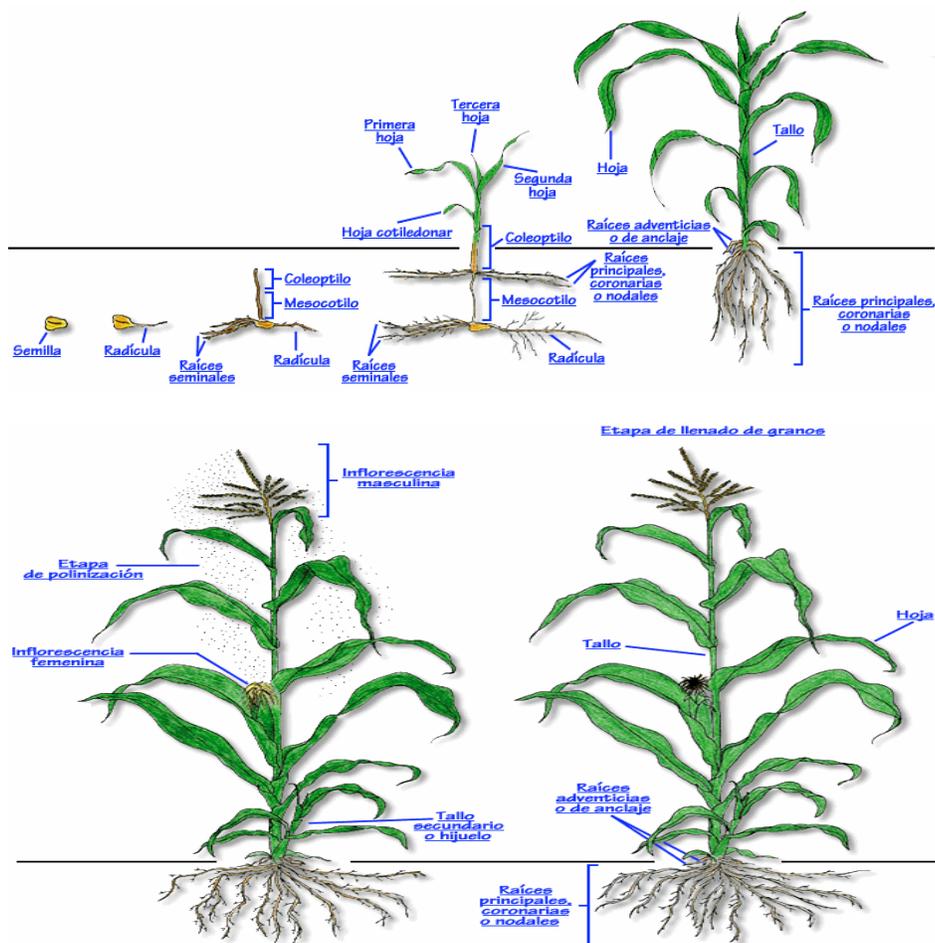


Figura 4. Crecimiento y desarrollo de la planta de maíz. Imagen tomada de la página web http://www.uc.cl/sw_educ/cultivos/index.html (22 abril 2007).

4.3.2. Cultivo de frijol

El frijol, *Phaseolus vulgaris* L., es una especie dicotiledónea anual, perteneciente a la familia de las fabáceas. Esta especie presenta una enorme variabilidad genética, existiendo miles de cultivares que producen semillas de los más diversos colores, formas y tamaños. Este cultivo se destina mayoritariamente a la obtención de grano seco, pero tiene una importante utilización hortícola, ya sea como ejote verde o como chícharo. En la Figura 5 se pueden observar las etapas de germinación, crecimiento vegetativo y la etapa de reproducción del frijol.

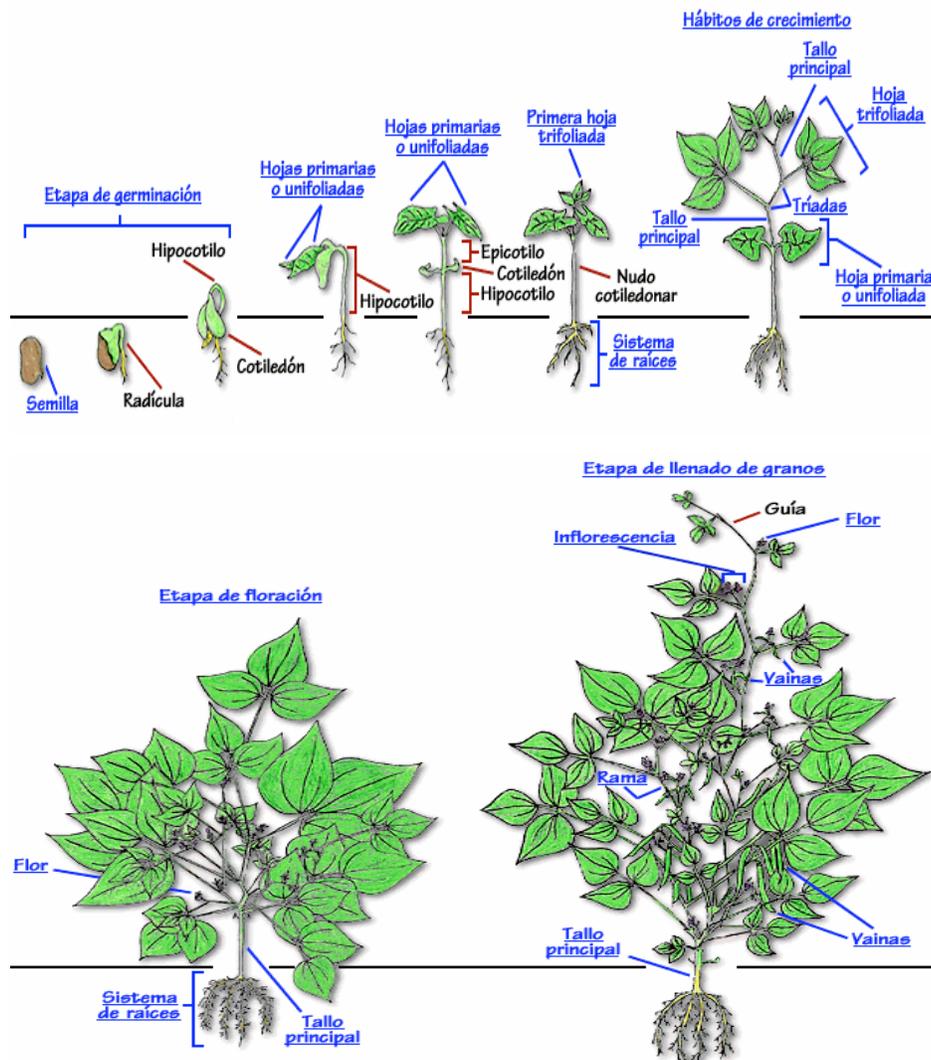


Figura 5. Crecimiento y desarrollo de la planta de frijol. Imagen tomada de la página web http://www.uc.cl/sw_educ/cultivos/index.html (22 abril 2007).

4.3.3. Cultivo de calabacita

La calabacita, *Cucurbita pepo* L., es una especie polimórfica arbustiva, anual, con sistema radical superficial típico de las cucurbitáceas, de extensión similar al de las ramas aéreas y muy ramificado. La floración es monoica, con flores grandes color amarillo y corola acampanada-erecta. Los frutos contienen semillas grandes, marginadas, planas y de color blanco-amarillento. En la Figura 6 se observan las etapas de germinación, crecimiento vegetativo y la etapa de reproducción de la calabacita.



1. Cotiledones y primeras hojas. 2. A los 45 días de siembra. 3. Aparición de las primeras flores femeninas. 4. Fruto cuajado y flores masculinas. 5 y 6. Momento de inicio de cosecha. 7 y 8. Detalles de las flores masculinas, femeninas. 9. Raíces de calabacita.

Figura 6. Crecimiento y desarrollo de la planta de calabacita. Imágenes tomadas de la página web http://www.uc.cl/sw_educ/cultivos/index.html (22 abril 2007).

4.3.4. Cultivo de avena

La avena es una especie monocotiledónea anual, perteneciente a la familia de las poáceas (gramíneas). En México se utiliza fundamentalmente para la obtención de forraje para la alimentación animal y el grano puede destinarse a alimentación humana o a alimentación animal. En la Figura 7 se pueden observar las etapas de germinación, crecimiento vegetativo y la etapa de reproducción de la avena.

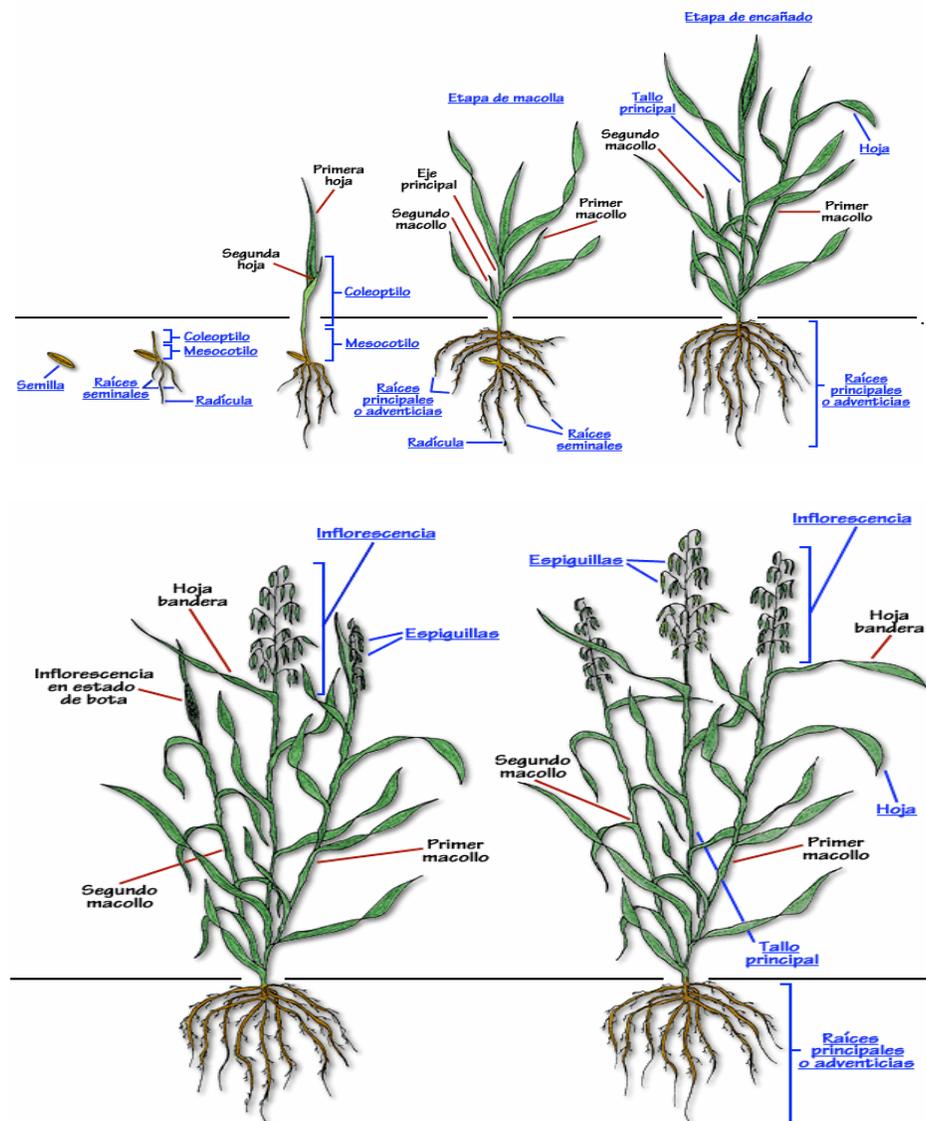


Figura 7. Crecimiento y desarrollo de la planta de avena. Imagen tomada de la página web http://www.uc.cl/sw_educ/cultivos/index.html (22 abril 2007).

4.4. Preparación del terreno

La preparación de la tierra consistió en dos pasos de rastra y la preparación de las camas de siembra, para después sembrar los cultivos (Figura 8).



Figura 8. Preparación de las camas de siembra.

4.5. Siembra, densidad, espaciamiento y fertilización

La siembra se realizó el día 27 de junio de 2006, utilizando las variedades, densidades y fertilización indicadas en el Cuadro 2. En los cultivos en hilera (maíz, frijol), se sembró a 70 cm de separación y a 20 cm entre matas; para el cultivo de calabacita la separación entre hileras fue de 70 cm y de 40 cm entre matas. Se sembraron dos semillas por mata para maíz y frijol, y para calabacita se sembró solo una semilla. La siembra se realizó en sentido de la pendiente y sin levantar surco a fin de no remover el suelo. La siembra de avena se hizo al voleo.

Cuadro 2. Densidad de población, variedad y fertilización.

| Cultivo | Variedad | Densidad | Fertilización Sulfato de amonio |
|-------------------|-----------------|-------------------------|--|
| Maíz | San Josecito | 100,000 matas por ha | 116.83 kg ha ⁻¹ |
| Frijol | Flor de junio | 100,000 matas por ha | No se fertilizó |
| Calabacita | Chey zucchini | 40,000 matas por ha | No se fertilizó |
| Avena | Juchitepec | 100 kg ha ⁻¹ | 116.83 kg ha ⁻¹ |

4.6. Manejo de cultivos

Los cultivos se mantuvieron libres de malezas a fin de que estas no influyeran en el proceso erosivo, ya que al cubrir el suelo evitan que este sea erosionado. El control de malezas fue manual y se realizó al ras del suelo evitando removerlo para no alterarlo.

4.7. Variables en estudio y metodologías empleadas

4.7.1. Cobertura vegetal

El método para estimar el porcentaje de cobertura vegetal cada 15 días para cada cultivo durante su desarrollo fue el de la fotografía digital. El procedimiento que se describe a continuación ejemplifica este método, para ello se tomó una fotografía digital multitemporal del frijol, tomada sobre una subparcela (Figura 9a):

1. Se gira y recorta la imagen, de tal forma que se obtuviera una imagen que captará la cobertura vegetal multitemporal y el suelo desnudo en el área de interés (Figura 9b).



a)

b)

Figura 9. La imagen rotada y recortada. a) Fotografía original b) Recorte del área de interés.

La fotografía recortada (Figura 9b), se sometió a un proceso de separación de bandas “RGB” (por sus siglas en inglés (Red, Green, Blue)). Este proceso permitió separar la imagen en tres bandas, estas son: roja, verde y azul (Figura 10).



banda azul

banda verde

banda roja

Figura 10. Fotografía separada en tres bandas.

Para la edición de la imagen digital multitemporal se utilizó el *software* denominado *Corel Photo Paint X3* (Corel Corporation, 2005).

3. Posteriormente, las imágenes se importaron al programa IDRISI (Eastman, 2003). Las imágenes obtenidas en formato jpeg (Joint Photographic Experts Group,

por sus siglas en inglés) se transformaron a formato rst (raster), que es el formato que utiliza este *software*.

4. Una vez que se han importado las 3 imágenes (rojo, verde y azul), se realizó la clasificación supervisada de imágenes, para generar puntos de control (campos de entrenamiento) que servirán para definir las firmas espectrales. Las imágenes procesadas para cada cultivo y para diferentes periodos de desarrollo vegetativo generaron las respectivas firmas espectrales, las cuales indican la presencia de la vegetación verde y el suelo desnudo (Figura 11).

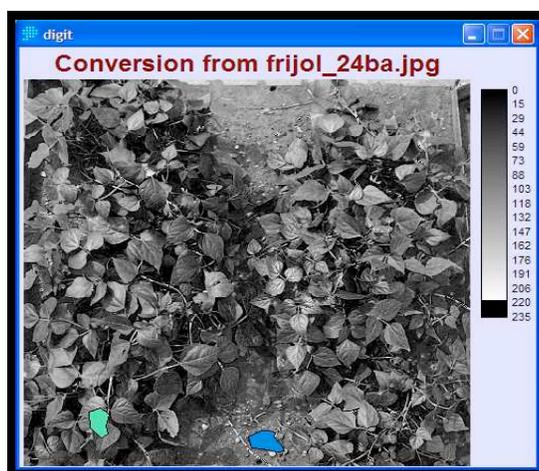
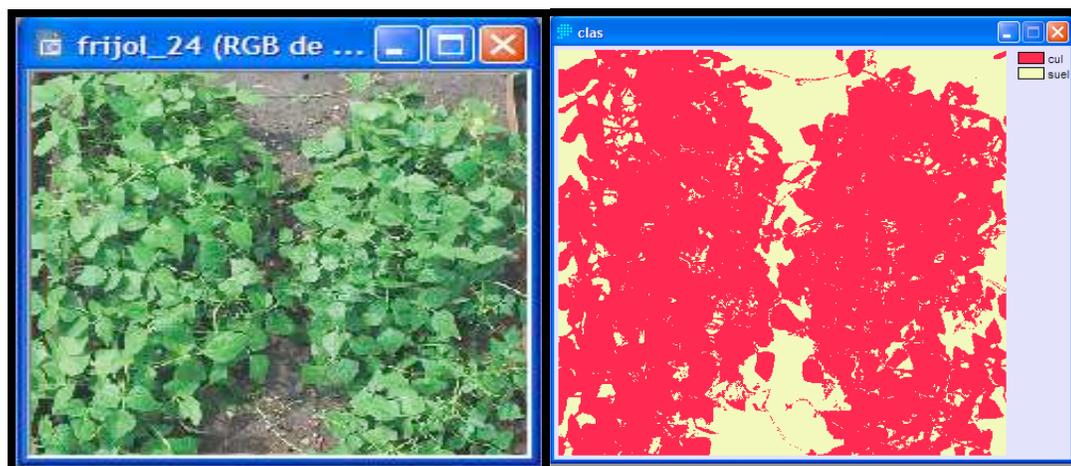


Figura 11. Polígonos de las dos clases de firmas deseadas: suelo (azul) y verde (vegetación).

Los campos de entrenamiento se formaron generando polígonos de píxeles de características espectrales similares, en alguna de las imágenes importadas. El número de polígonos o campos de entrenamiento para cada clase depende de la cantidad de píxeles seleccionados en cada polígono. Posteriormente, el programa extrae los valores de cada píxel seleccionado en las tres bandas para generar las estadísticas de cada clase (media, varianza, etc.) y la firma espectral.

5. El siguiente paso consistió en utilizar el clasificador de firmas espectrales denominado MAXLIKE, el cual está basado en el proceso estadístico de máxima verosimilitud, con una probabilidad de asignación igual al 50% cuando se trate de dos clases y de 33% cuando sean tres clases (igual probabilidad). Por este

procedimiento, se realizó una comparación píxel por píxel, en las tres bandas, con las firmas espectrales de cada clase; y asignó a cada uno de los píxeles de la imagen a la clase con la que tengan mayor probabilidad de pertenencia. El resultado de este clasificador se presenta en la Figura 12.



a) Fotografía original

b) Fotografía clasificada

Figura 12. Resultado de la clasificación supervisada, vegetación (rojo) y suelo (amarillo).

6. Finalmente se calculó el porcentaje de cobertura vegetal utilizando el modulo “área” de IDRISI, el cual contabiliza el número de píxeles asignados a cada clase. El porcentaje de cobertura vegetal estimado para el cultivo de frijol y del suelo desnudo de la fotografía de la Figura 12 se muestra en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Ejemplo de cálculo del porcentaje de cobertura vegetal.

| DESCRIPCIÓN | CATEGORIA | PÍXELES | COBERTURA (%) |
|-------------------|-----------|-----------|---------------|
| Vegetación (rojo) | 1 | 552448.00 | 75.42 |
| Suelo (amarillo) | 2 | 180092.00 | 24.58 |
| TOTAL | | 732540.00 | 100 |

4.7.2. Raíces

4.7.2.1. Cubeta muestreadora, instalación en el campo y extracción de raíces

Como se parte del supuesto que en los primeros 10 cm de suelo superficial es donde se da principalmente la erosión, se diseñó la cubeta a manera de obtener capas de 10 cm de raíces hasta una profundidad de 35 cm. La cubeta constó de cuatro capas: tres de 10 cm y una de 5 cm y cada capa se delimitó con una malla de acero con cuadrículas de 1 cm por lado, como se aprecia en la Figura 13.

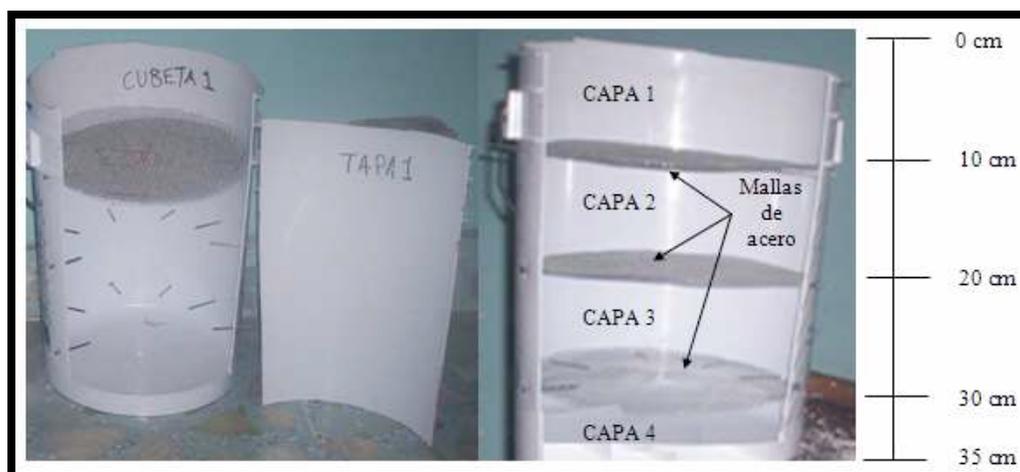


Figura 13. Estructura de la cubeta muestreadora de raíces.

La instalación de las cubetas muestreadoras de raíces consistió en los pasos siguientes: 1) se hace un hoyo de la mismas dimensiones de la cubeta; 2) se llena la cubeta de tierra, capa por capa hasta la parte superior de ésta; 3) luego se introduce la cubeta al hoyo y se procura dejarla un centímetro por abajo del nivel del suelo (Figura 14).

Una vez instaladas las cubetas se sembraron las semillas al centro de las cubetas para permitir que las raíces se distribuyeran uniformemente.



Figura. 14. Cubetas muestreadoras usadas para el estudio de las raíces.

Para extraer las raíces, se excavó con una pala alrededor de la cubeta, la cual se sujetó y se jaló a la superficie (Figura 15).



Figura 15. Extracción de las raíces del suelo.

4.7.2.2. Cuantificación de raíces (densidad longitudinal de raíces)

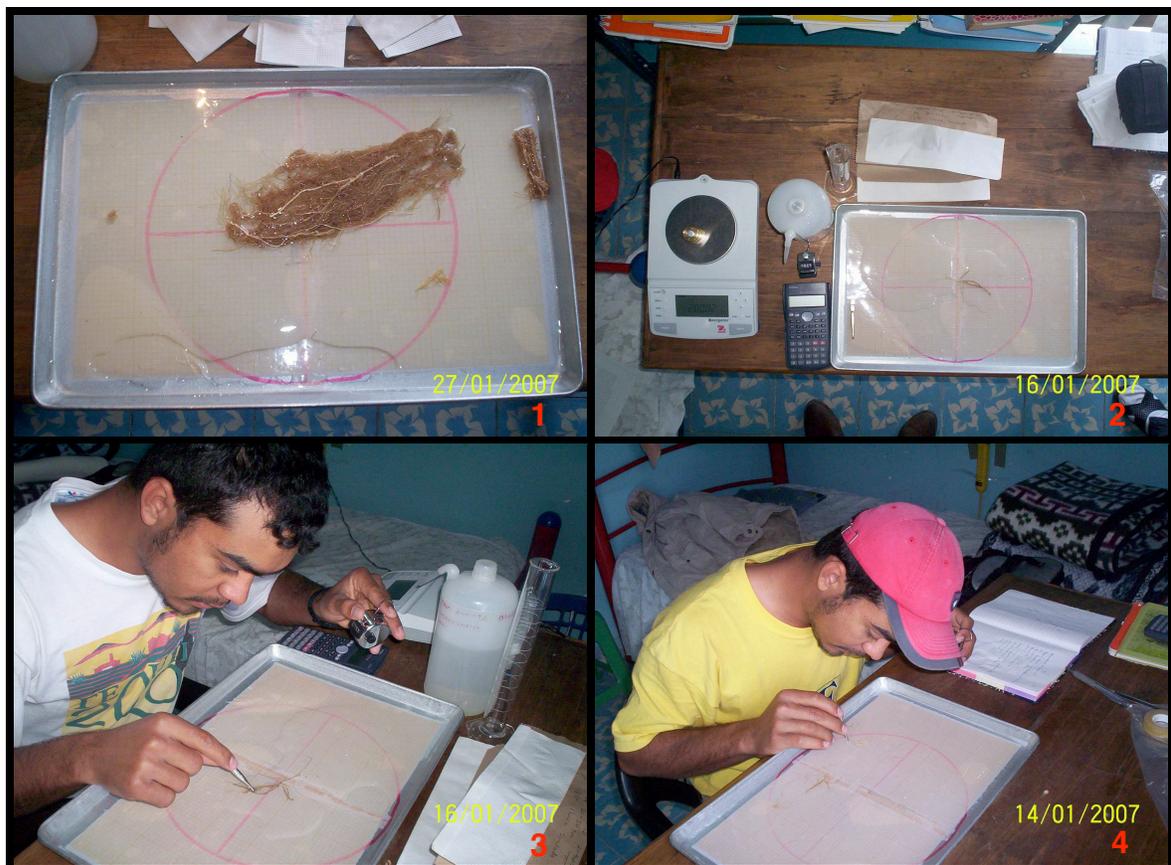
Las raíces fueron extraídas de la cubeta mediante el lavado. Se retiraron de ellas las impurezas (materia orgánica, raíces muertas, partículas finas de suelo) utilizando el método descrito por Böhm (1979), después se eliminó la humedad utilizando toallas absorbentes (Figura 16).



De la totalidad de las raíces extraídas en las cubetas (con la metodología señalada anteriormente) se tomó únicamente la primera capa de 10 cm de raíces y

se obtuvieron los siguientes parámetros: longitud total de raíces (**LR**) y densidad longitudinal de raíces (**DLR**).

La **LR** se estimó con el método modificado de Tennant (1975), que se basa en el método de Intersección de Líneas propuesto por Newman (1966). El método consiste en extender las raíces sobre una superficie plana cuadrículada, realizando un conteo sistemático del número de intersecciones entre las raíces y las líneas de la cuadrícula (Figura 17). La longitud total de estas raíces puede estimarse por la ecuación $R = \pi NA / 2H$ donde R es la longitud total de raíces, N es el número de intersecciones, A el área dentro de la cual están las raíces y H la longitud total de las líneas rectas.



1. Superficie plana con cuadrícula de 0.5 cm por lado, en donde se extienden las raíces. 2. Instrumentos para medir raíces (balanza analítica, contador de mano, probeta graduada, piceta, pinzas saca-cejas, toallas absorbentes etc.). 3 y 4. Forma de ejecutar el método.

Figura 17. Determinación de la longitud total de raíces por el método de Tennant (1975).

Tennant (1975), argumentó que la ecuación de Newman puede ser simplificada. Para una cuadrícula de indeterminadas dimensiones, las intersecciones contadas pueden ser convertidas a centímetros medidos usando la ecuación R (longitud raíces) = $11/14 \times N$ (Número de intersecciones) \times Unidad de cuadrícula. Como propuesto por Tennant (1975), la fracción $11/14$ de la ecuación puede ser combinada con la unidad de cuadrícula, y de esa manera se obtiene el factor de conversión de longitud.

La LR medida en cada cubeta fue multiplicada por el número de matas de las plantas existentes en el área de la subparcela (1 m^2) muestreada por la cubeta, para el caso del maíz y frijol fueron 10, y para la calabacita fueron 4. En el caso de la avena la LR medida fue multiplicada por el número de tallos contabilizados en la subparcela que fueron para los primeros 15 días 95, 1268 a los 30 días, 1768 a los 50 días y 2858 a los 65 días de desarrollo.

Este parámetro fue expresado en km longitudinales. A partir de la LR dividida entre el volumen de suelo ocupado por las raíces que fue de 0.10 m^3 (1 m^2 de área de subparcela por 0.1 m de profundidad de la capa de suelo), se obtuvo la DLR expresada en km m^{-3} , mediante la siguiente relación matemática (Teo *et al.*, 1995; Smit *et al.*, 2000):

$$DLR = \frac{LR}{V}$$

Donde V es el volumen de suelo ocupado por las raíces.

Es importante mencionar que los trabajos de investigación que implican determinación de longitud de raíces, en lugar de peso de raíces, generalmente requieren mayor tiempo y esfuerzo por parte del investigador, debido a que el número de plantas que puede ser estudiado es relativamente bajo (Pire, 1986). En este sentido las investigaciones muestran que las plantas cuando tienen sistemas radicales con una gran cantidad y longitud de raíces disminuyen la erosión del suelo significativamente (Ghidey y Alberts, 1997; Gelder, 2000; Mamo y Bubbenzer, 2001a,

2001b; Gyssels et al., 2006). Es por ello que en este trabajo se estimó la densidad longitudinal de raíces de los cuatro cultivos estudiados y se evaluó su relación con la pérdida de suelo, dado que este indicador es el de mayor relevancia para evaluar los efectos de las raíces sobre los procesos de erosión y da una mejor idea de la distribución de las raíces en el suelo. (De Baets *et al.*, 2006). En otro sentido es aceptado que la habilidad de las plantas para absorber agua y sales minerales del suelo está más estrechamente relacionada a la longitud de las raíces que al peso de las mismas (Singh y Sale, 2000; Peter *et al.*, 2000; Kimura y Yamasaki, 2001; Qin *et al.*, 2004).

4.7.3. Esgurrimiento superficial y pérdida de suelo

En el trabajo aquí descrito se usaron los cultivos de maíz, frijol, calabacita y avena, los cuales son comunes en la región. Las condiciones bajo las cuales se midió la pérdida de suelo y escurrimento superficial fue bajo la simulación de la precipitación pluvial, utilizando para tal efecto el simulador tipo Purdue (Alcalá *et al.* 1998) con intensidad constante de 80 mm h^{-1} , lluvia considerada como máxima para esta zona de estudio. Se realizaron 32 pruebas (cuatro para cada tratamiento), siendo el tiempo de simulación de una hora.

El simulador (Figura 18) está constituido por una base metálica (1) situada a 2 metros de altura, sobre la cual se monta una estructura de aluminio en forma de escalera (2) y al centro de está, atraviesa un tubo de PVC, conductor de agua, de dos pulgadas de diámetro (5.08 cm) (3); sobre la estructura de aluminio se monta una conexión de plástico (4), con un manómetro (5). Funciona mediante una planta generadora de energía (6) con salidas de 240 V para la motobomba de agua (7) y de 120 V para el sistema de computo (8). Con esta potencia eléctrica, la motobomba de 1 hp con salida de 2.54 cm (1.0") sube agua desde un depósito (9), pasa por la conexión de una manguera de 2.54 cm (1.0") donde se regula la presión de agua (10), misma que se mantiene constante a 8 lb in^{-2} ($0.05637 \text{ kg m}^{-2}$), sube hasta la conexión de plástico (4) que contiene el manómetro (5); posteriormente envía el agua

a una manguera de 2.54 cm (11) conectada con los aspersores (boquillas V-jet con abertura de 80/100) (12), para rociar el agua sobre el suelo en forma de lluvia. La intensidad, el número de oscilaciones por minuto de los aspersores o boquillas y la duración de la lluvia, se controlan con el programa de cómputo denominado “Fieldsim”; se emite un mensaje a una caja de control (13) que recibe esta orden y pone a funcionar un motor (14) que hace girar el tubo (3) y las boquillas (12), y ejecuta así la acción de la simulación de lluvia. Una vez que inicia la oscilación de los aspersores, al llegar a las orillas, depositan el agua sobre cajas de aluminio (15) que se conectan con tubo de plástico (16), por medio del cual se recicla el agua hacia el depósito (9).



1. Base metálica 2. Estructura de aluminio en forma de escalera 3. Tubo de PVC conductor de agua. 4. Conexión de plástico 5. Manómetro 6. Planta generadora de energía 7. Motobomba de agua 8. Sistema de computo 9. Deposito de agua 10. Manguera reguladora de presión 11. Manguera de conexión para aspersores 12. Aspersores 13. Caja de control 14. Motor 15. Cajas de aluminio 16. Tubo de plástico.

Figura 18. Simulador de lluvias tipo Purdue.

Para obtener el volumen escurrido y la producción de sedimentos, las subparcelas se delimitaron con láminas de hierro, enterradas 5 cm y sobresaliendo 5 cm. En la parte baja de la subparcela se adaptó un colector metálico que permitió recoger el escurrimiento en cubetas de 8 litros de capacidad, a intervalos de tiempo de 5 minutos, cada 15 días durante 3 meses (julio a septiembre).

Se pesó el volumen escurrido y el sedimento colectado en las cubetas (Psh). Para acelerar el proceso de precipitación de los sólidos en suspensión de cada cubeta, se agregó alumbre al 10% (sulfato doble de potasio y aluminio). Después 30 minutos se decantó y desechó una parte del volumen escurrido. El sedimento fue trasladado al laboratorio y puesto a secar a 105 °C. Después de 24 horas se obtuvo el peso seco del sedimento (Pss).

La cuantificación del escurrimiento superficial en la subparcela se obtuvo con:

$$Es = (10*(Psh-Pss) / \rho_a) / A_{sub}.$$

Donde:

Es, es el escurrimiento superficial en mm

Psh, es el volumen escurrido y el sedimento colectados en g

Pss, es el peso del sedimento seco en g

ρ_a , es la densidad del agua 1g cm^{-3}

A_{sub} , es el área de la subparcela cm^{-2}

10, es el factor de conversión a milímetros

Para la pérdida de suelo en cada subparcela Psh y Pss fueron manejados en kg m^{-2} a partir de que cada subparcela tenía una superficie de 1 m^2 .

4.8. Toma de datos

El arreglo de las parcelas en el campo, como se describió antes, obedeció al procedimiento utilizado para la obtención de los datos. El procedimiento general fue como sigue: una vez llegada la primera fecha de simulación de lluvia (a los 15 días

de desarrollo) se eligieron dos subparcelas para cada cultivo, a una de las subparcelas se le cortó la cobertura vegetal al ras del suelo con tijeras y fue utilizada para evaluar el efecto de las raíces.

Previo a simular la lluvia, se instalaron pluviómetros tipo embudo cuyo contenido se midió al final. Mientras se simulaba la lluvia se midió el escurrimiento superficial y se fueron colectando las muestras de escurrimiento superficial para medir posteriormente su contenido de sedimentos y así conocer las pérdidas de suelo.

Concluida la simulación de la lluvia, en la subparcela sin cobertura vegetal, se procedió a la extracción de raíces. A la subparcela con cobertura vegetal se le tomó una fotografía digital. A esta misma subparcela se le siguió dando el manejo necesario y fue utilizada en la siguiente fecha como la subparcela en donde se evaluó el efecto de las raíces (Figura 19).

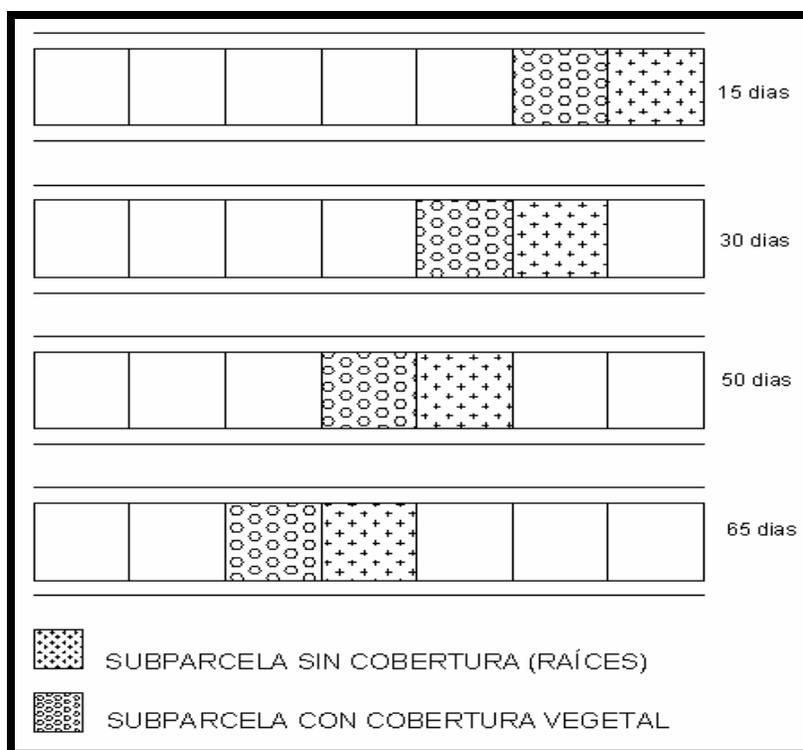


Figura 19. Secuencia seguida en cada fecha de simulación de lluvia donde siempre se comparó una subparcela con cobertura vegetal con una subparcela sin cobertura (raíces).

4.9. Modelos utilizados

Los datos fueron capturados y analizados en una hoja de cálculo Microsoft Office Excel 2003 y en el paquete estadístico CurveExpert 1.3 (Hyams, 1995).

Para el análisis de los datos se usó estadística descriptiva utilizando tablas y gráficas. También se utilizó estadística inferencial para generar modelos matemáticos (lineal, cuadrático y exponencial en Excel, y exponencial y logístico en el paquete estadístico CurveExpert 1.3) que estimaron el comportamiento de las variables estudiadas.

Formas generales de los modelos utilizados:

a. Modelo lineal: $y = a + bx$, donde a y b son constantes.

b. Modelo exponencial: $y = a(1 - e^{-bx})$ o $y = ae^{-bx}$, donde a y b son constantes.

c. Modelo logístico: $y = \frac{a}{1 + be^{-cx}}$, donde a, b y c son constantes.

Mediante el análisis gráfico se estableció una comparación entre subparcelas, para cada una de variables estudiadas siguiendo los días de aplicación de lluvia simulada.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se presenta el análisis del desarrollo de la cobertura vegetal y de las raíces de los cultivos durante el periodo experimental, y se comparan los datos obtenidos de cada una de estas variables. También se analiza el efecto de estas variables en la reducción del escurrimiento superficial y la pérdida de suelo.

5.1. Desarrollo de la cobertura vegetal

En los primeros 15 días de crecimiento, el desarrollo de la cobertura vegetal en los cultivos de escarda (maíz, frijol y calabacita) fue en promedio 2.92%, con una tasa de crecimiento diaria de 0.2%. En contraste el cultivo tupido (avena) tuvo una tasa de crecimiento diaria del 3.58% alcanzando una cobertura vegetal de 53.77% en el mismo periodo. De los 15 a los 30 días de desarrollo, los cultivos de escarda crecieron a una tasa de crecimiento diaria promedio de 1.16% llegando a una cobertura vegetal promedio de 20.32%, esta tasa de crecimiento fue similar a la del cultivo tupido (1.36%) en el mismo periodo, pero este cultivo alcanzó una cobertura vegetal del 74.13%. De los 30 a los 50 días los cultivos de escarda alcanzaron su mayor tasa de crecimiento diaria de 2.24%, alcanzando una cobertura vegetal promedio de 65.16%, en este mismo periodo el cultivo tupido creció a una tasa diaria de 0.95% y llegó a 93.21% de cobertura vegetal. En el último periodo de análisis (de 50 a 65 días de desarrollo) los cultivos de escarda crecieron a una tasa diaria de 1.02%, alcanzando una cobertura vegetal promedio de 80.46% en tanto que el cultivo tupido creció a una tasa diaria de 0.1% y su cobertura vegetal llegó a 94.68%.

Los cambios en la cobertura vegetal indican la rapidez del crecimiento del cultivo tupido que alcanzó su máxima tasa en los primeros 15 días, hecho que contrasta con los cultivos de escarda que durante este período tienen su menor tasa de crecimiento diaria.

La cobertura vegetal del cultivo tupido en los primeros 30 días superó el 75% de la cobertura vegetal total que alcanzó al final del periodo experimental mientras que los cultivos de escarda habían alcanzado solo el 25% de la cobertura vegetal. Estas diferencias en el crecimiento de la cobertura vegetal se atribuyen a que los cultivos de escarda se siembran en hilera y a una cierta distancia entre matas y por ello tienen una baja densidad de siembra, en cambio el cultivo tupido se siembra al voleo alcanzando una alta densidad de siembra (Cuadro 4).

Cuadro 4. Evolución de la cobertura vegetal, según días de desarrollo.

| Cultivos | | Cobertura vegetal (%) | | | |
|---------------|-----------------|-----------------------|--------------|--------------|--------------|
| | | 15 | 30 | 50 | 65 |
| De escarda | Maíz | 2.48 | 27.08 | 56.62 | 66.23 |
| | Frijol | 5.18 | 17.69 | 75.42 | 92.47 |
| | Calabacita | 1.12 | 16.21 | 63.45 | 82.68 |
| | Promedio | 2.92 | 20.32 | 65.16 | 80.46 |
| Tupido | Avena | 53.77 | 74.13 | 93.21 | 94.68 |

5.1.1. Comparación del desarrollo de la cobertura vegetal en los cultivos

De los cultivos de escarda, el frijol presentó la mayor cobertura vegetal durante los primeros 15 días de desarrollo, seguido por el maíz y la calabacita, pero a los 30 días el maíz aceleró su crecimiento en comparación a los otros dos, los cuales presentaron coberturas similares. A los 50 días el frijol y la calabacita mostraron mayor desarrollo vegetativo que el maíz (aproximadamente en 18.8% y 6.83%, respectivamente), tendencia que continuó hasta los 65 días. La avena en cambio inició un acelerado desarrollo de su cobertura vegetal en los primeros 15 días de siembra (53.77%), aumentando este crecimiento de la cobertura vegetal hasta los 50 días en 39.44%, de los 50 a los 65 días de desarrollo este crecimiento se redujo en 1.47% debido a que en este periodo alcanzó su máximo desarrollo fisiológico (Figura 20).

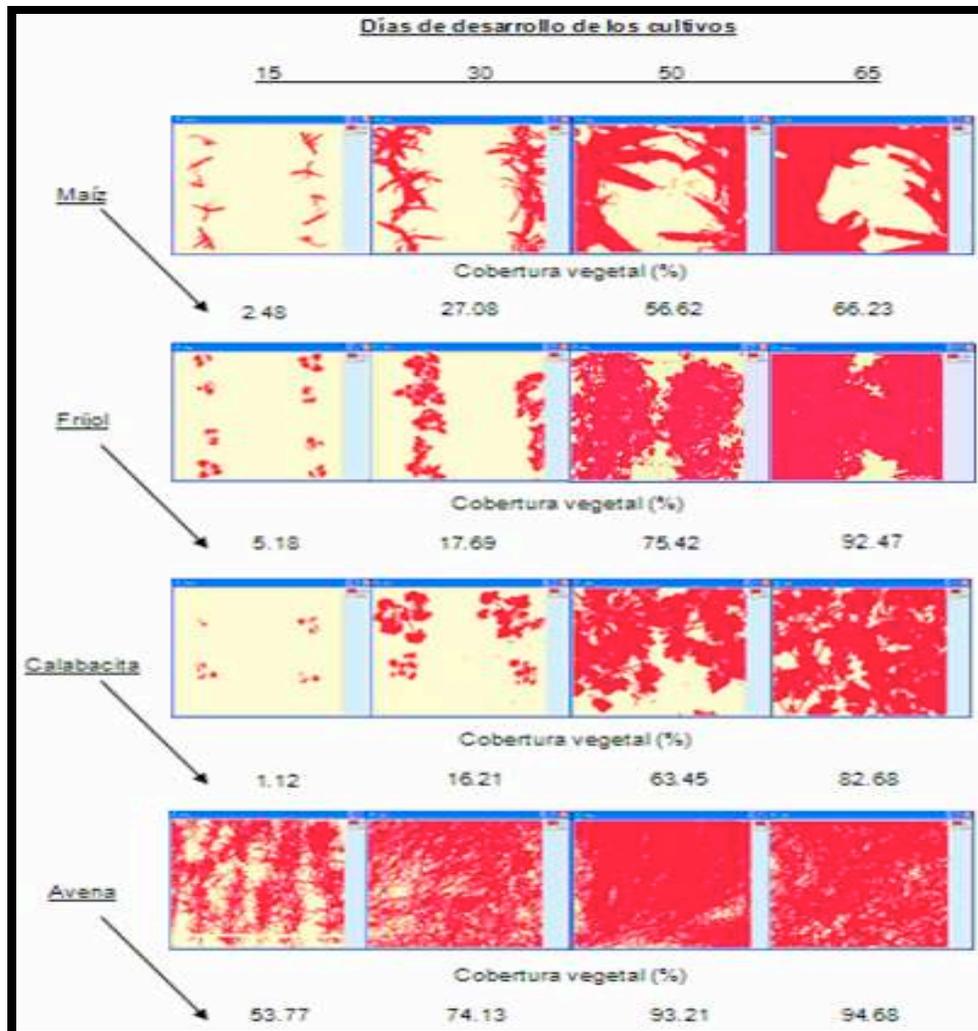


Figura 20. Evolución de la cobertura vegetal, durante el periodo experimental. Cobertura vegetal (rojo) y suelo (amarillo).

Este comportamiento hace suponer que los cultivos tupidos como la avena, por su mayor cobertura vegetal, tendrían desde el principio mayor efecto de reducción sobre el escurrimiento superficial y la pérdida de suelo, en comparación los cultivos de escarda que tienen menor cobertura en ese periodo (primeros 30 días de desarrollo).

En la Figura 21 se presenta el comportamiento multitemporal modelado de la cobertura vegetal de cada uno de los cultivos en función de los días de desarrollo. El modelo logístico se ajustó mejor a los datos de los cultivos de escarda en tanto que el modelo exponencial ajustó adecuadamente a los datos del cultivo tupido.

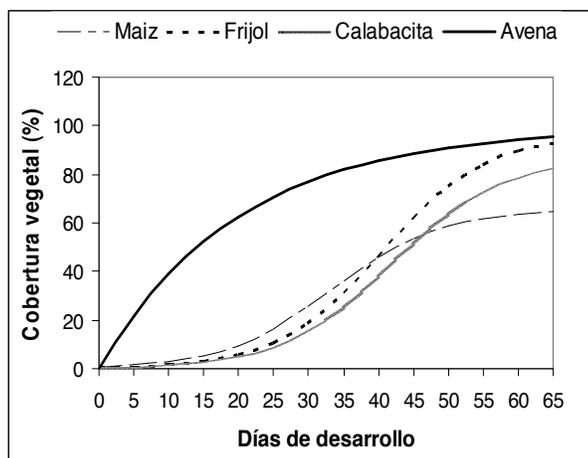


Figura 21. Comportamiento modelado de la cobertura vegetal de los cultivos durante el ciclo experimental.

A continuación en el Cuadro 5 se muestran los modelos presentados en la Figura 21.

Cuadro 5. Descripción del comportamiento modelado de la cobertura vegetal, utilizando las ecuaciones de mayor ajuste.

| Cultivo | Tipo de modelo | Descripción matemática | R ² |
|------------|----------------|--|----------------|
| Maíz | Logístico | $y = \frac{65.52}{1 + 83.84 e^{-0.13 x}}$ | 0.99 |
| Frijol | Logístico | $y = \frac{96.07}{1 + 245.21 e^{-0.13 x}}$ | 0.99 |
| Calabacita | Logístico | $y = \frac{87.08}{1 + 204.52 e^{-0.12 x}}$ | 0.99 |
| Avena | Exponencial | $y = 99.35 (1 - e^{-0.04 x})$ | 0.99 |

Esta información permite concluir que los cultivos tupidos por su mayor porcentaje de cobertura vegetal en las diferentes etapas de desarrollo del cultivo tienen mayor capacidad para proteger al suelo en contra de los agentes erosivos en comparación con los cultivos de escarda.

5.2. Desarrollo de las raíces

En los primeros 15 días de desarrollo, el incremento de la DLR en los cultivos de escarda fue en promedio 0.96 km m^{-3} , lo que da una tasa de crecimiento diaria de 0.06 km m^{-3} . El cultivo tupido tuvo una tasa de crecimiento diaria en este periodo de 0.44 km m^{-3} , alcanzando una DLR de 6.6 km m^{-3} . A partir de ese periodo los cultivos de escarda y el cultivo tupido mantuvieron una tendencia positiva en su tasa de crecimiento. Los cultivos de escarda crecieron a una tasa diaria promedio de 0.09 km m^{-3} ; de los 15 a los 30 días de desarrollo, a una tasa diaria de 0.11 km m^{-3} , de los 30 a los 50 días y en el ultimo periodo alcanzaron la mayor tasa de crecimiento diaria de 0.87 km m^{-3} . El cultivo tupido tuvo la mayor tasa de crecimiento diaria de 4.40 km m^{-3} en el periodo de 15 a 30 días; de 1.33 km m^{-3} de los 30 a los 50 días; y de 2.47 km m^{-3} en el ultimo periodo analizado (Cuadro 6). Los valores de DLR encontrados en los cultivos bajo estudio están dentro de los intervalos reportados por De Willigen y Van Noordwijk, citados por De Baets *et al.* (2006) y con Mamo y Bubbenzer (2001b), quienes reportaron para cultivos agrícolas una DLR que varía de 0 a 200 km m^{-3} y en gramíneas $>250 \text{ km m}^{-3}$, respectivamente. Esta información contrasta con la reportada por De Baets *et al.* (2006) quienes en pastos en 15 cm de suelo encontraron una DLR entre 0 y $6,200 \text{ km m}^{-3}$, explicada por una alta densidad de siembra (10,000 semillas por metro cuadrado).

Cuadro 6. Evolución de la DLR en la capa 0-10 cm, según días de desarrollo.

| Cultivos | | Densidad longitudinal de raíces (km m^{-3}) | | | |
|------------|-----------------|--|-------------|-------------|--------------|
| | | 15 | 30 | 50 | 65 |
| De escarda | Maíz | 2.4 | 4.6 | 5.1 | 37.5 |
| | Frijol | 0.3 | 1.6 | 4.3 | 8.6 |
| | Calabacita | 0.2 | 0.8 | 4.4 | 6.8 |
| | Promedio | 0.96 | 2.30 | 4.60 | 17.65 |
| Tupido | Avena | 6.6 | 72.7 | 99.2 | 136.2 |

5.2.1. Comparación del desarrollo de las raíces en los cultivos

El desarrollo de la DLR en los cultivos de escarda (maíz, frijol y calabacita) fue similar durante los primeros 50 días (entre 4.3 y 5.1 km m^{-3}). Entre los 50 a 65 días el aumento de la DLR fue mayor, aunque en la calabacita la DLR solamente aumento en 54.54%, en el frijol este aumento fue del 100% y en el maíz fue de hasta 635.29%. De acuerdo con Anderson (1987), en el cultivo de maíz la máxima densidad longitudinal de raíces se alcanza en la etapa de antesis y mueren una vez que la semilla madura (Figura 22).

La avena, por su parte, mostró la menor DLR (6.6 km m^{-3}) en los primeros 15 días de desarrollo. Esta densidad aumentó 1963.64% a los 65 días, respectó a los 15 días, presentando una DLR de 136.2 km m^{-3} . Así pues, puede observarse, que la DLR fue mucho mayor en la avena con relación a los cultivos de maíz, frijol y calabacita, en una proporción de 2.6, 14.8 y 19 veces, respectivamente (Figura 22).

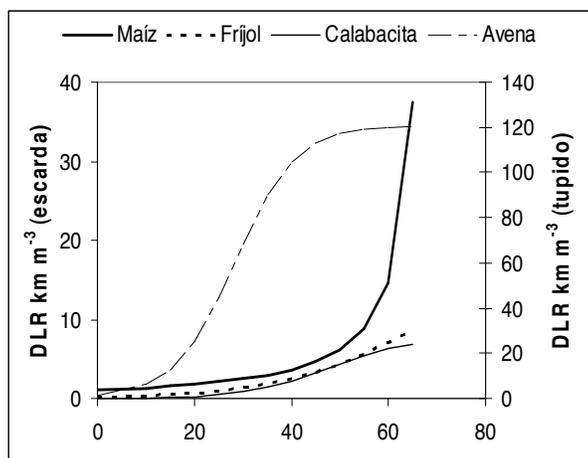


Figura 22. Comportamiento modelado de la DLR de los cultivos durante el ciclo experimental.

Para explicar el comportamiento del DLR por cultivo, los valores obtenidos se ajustaron a modelos matemáticos que permitieran a partir de días de desarrollo del cultivo predecir la DLR (Cuadro 7).

Cuadro 7. Descripción del comportamiento modelado de la DLR, utilizando las ecuaciones de mayor ajuste.

| Cultivo | Tipo de modelo | Descripción matemática | R ² |
|------------|----------------|--|----------------|
| Maíz | Logístico | $y = \frac{-2.10}{1 - 3.01e^{-0.02x}}$ | 0.99 |
| Frijol | Logístico | $y = \frac{18.75}{1 + 99.58e^{-0.07x}}$ | 0.99 |
| Calabacita | Logístico | $y = \frac{7.60}{1 + 318.45e^{-0.12x}}$ | 0.99 |
| Avena | Logístico | $y = \frac{120.83}{1 + 94.73e^{-0.16x}}$ | 0.95 |

Esta información permite concluir que los cultivos tupidos por su mayor DLR en las diferentes etapas de desarrollo del cultivo tienen mayor capacidad para retener el suelo en su lugar en contra de los agentes erosivos en comparación con los cultivos de escarda.

5.3. Comparación de la evolución de la cobertura vegetal y las raíces

Como se concluyó anteriormente, tanto la cobertura vegetal como las raíces de los cultivos de maíz, frijol y calabacita crecieron en forma logística. Para el periodo experimental estudiado (un total de 65 días), este crecimiento se caracterizó por periodos de lento y rápido crecimiento.

En la cobertura vegetal de maíz el período de lento crecimiento comprendió los primeros 15 días presentándose después un crecimiento rápido hasta los 50 días. En cambio en el crecimiento del sistema radical fue lento hasta los 50 días de desarrollo y aumentó en el periodo de los 50 a 65 días (Figura 23a). Lo cual se explica porque en este periodo fenológico el cultivo entró en etapa de antesis y es cuando se presenta la mayor DLR lo cual coincide con lo reportado por Anderson (1987). La cobertura vegetal del maíz alcanzó a los 65 días un porcentaje de 66.23%,

similar a los resultados de Osuna y Esquivel (1996) quienes reportaron que el cultivo de maíz a los 70 días de desarrollo había alcanzado 75% de cobertura vegetal.

Los cultivos de frijol y calabacita mostraron un ritmo de crecimiento de cobertura vegetal y de DLR similares. En ambos cultivos, tanto la cobertura vegetal como las raíces crecieron lentamente durante los primeros 30 días de desarrollo y aumentaron de los 30 a los 65 días (Figura 24a y 25a). El frijol alcanzó a los 65 días de desarrollo una cobertura vegetal de 92.47%, similar a la reportada por Navarro *et al.* (2007) quienes encontraron a los 70 días una cobertura vegetal de 90%.

Al correlacionar el porcentaje de cobertura vegetal y la DLR de estos cultivos de escarda se encontró que se ajustan a un modelo logístico, el cual permite de mejor forma predecir el crecimiento de las raíces a partir de la cobertura vegetal (Figura 23b, 24b y 25b).

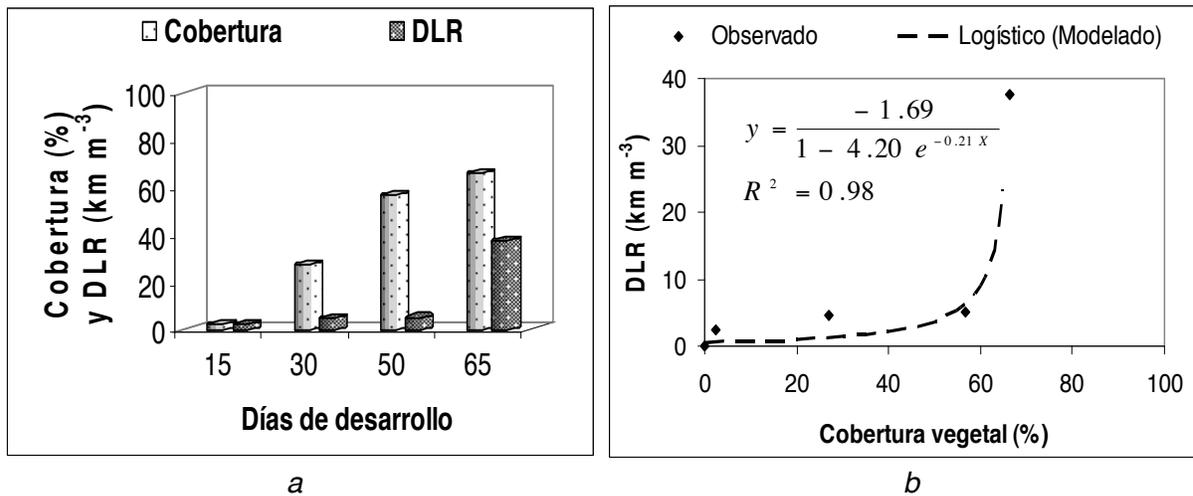


Figura 23. Comparación de la evolución de la cobertura vegetal y la DLR en maíz.

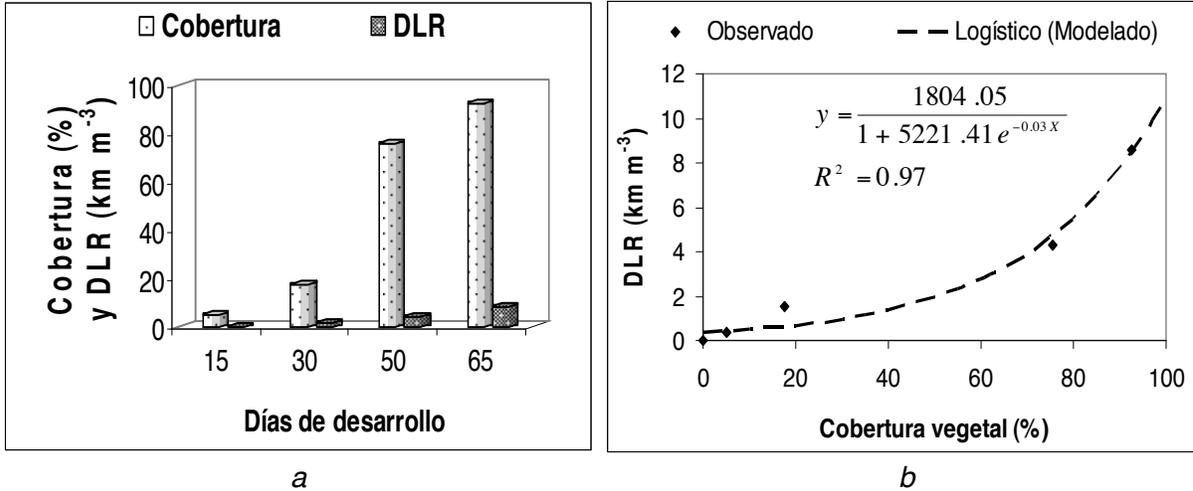


Figura 24. Comparación de la evolución de la cobertura vegetal y la DLR en frijol.

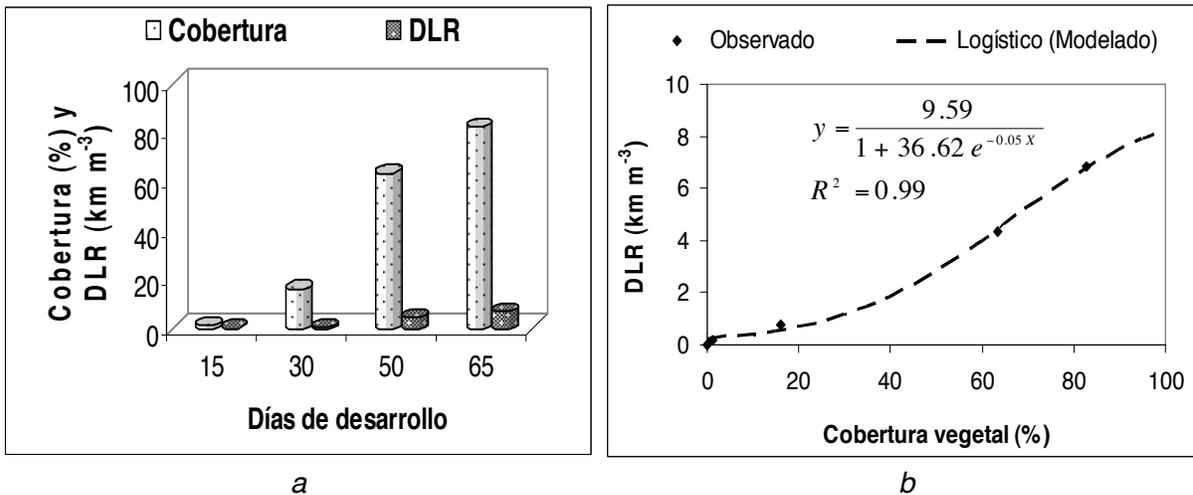


Figura 25. Comparación de la evolución de la cobertura vegetal y la DLR en calabacita.

La avena como cultivo tupido mostró un desarrollo de la cobertura vegetal distinto a los cultivos de escarda señalados anteriormente, en tanto que el desarrollo de sus raíces fue similar. La cobertura vegetal creció en forma exponencial, siendo la etapa de crecimiento más rápida en los primeros 15 días de desarrollo aumentando hasta los 65 días. Las raíces presentaron su mayor tasa de crecimiento en los primeros 30 días de desarrollo, luego de lo cual crecieron paulatinamente (Figura 26a). La cobertura vegetal de la avena fue de 94.68% a los 65 días de desarrollo similar a la reportada por Navarro *et al.* (2005) quienes encontraron, en avena, 99% de cobertura vegetal a los 85 días de desarrollo.

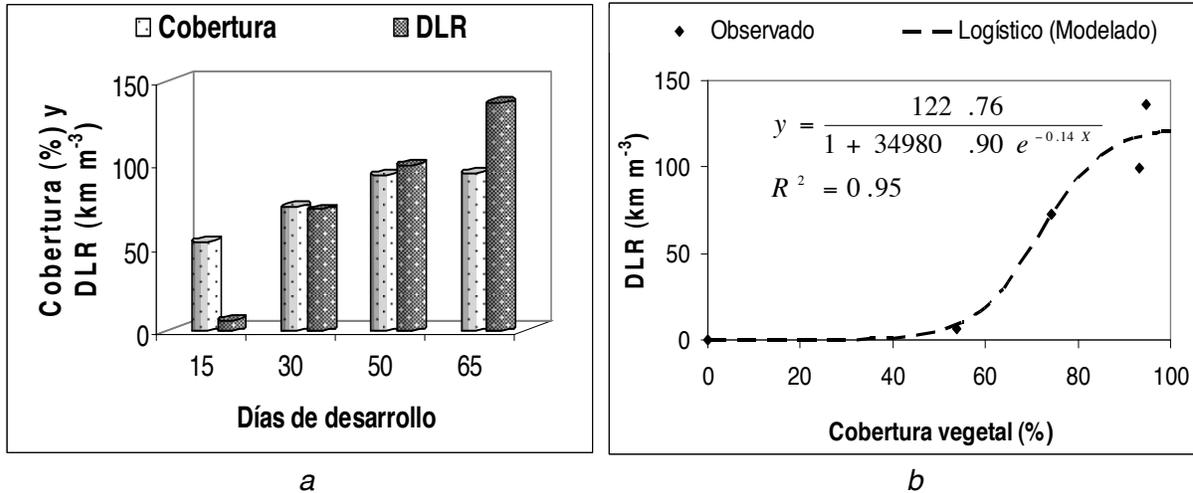


Figura 26. Comparación de la evolución de la cobertura vegetal y DLR en avena.

El análisis de correlación entre el porcentaje de cobertura vegetal y la DLR del cultivo de avena se muestra con un modelo logístico a partir del cual se puede estimar la DLR basándose en el porcentaje de cobertura vegetal (Figura 26b).

En las gráficas anteriores se observa que el maíz, frijol y calabacita existe un patrón constante de crecimiento de la parte área y de la raíz. En los primeros 50 días de desarrollo el crecimiento de la planta se orienta principalmente al tallo (parte aérea) y cuando ésta alcanza 60% de cobertura vegetal la planta da preferencia de crecimiento al sistema radical. En avena lo anterior se da en los primeros 15 días cuando tiene una cobertura vegetal de 53.77%.

5.4. Escurrimiento superficial

5.4.1. Escurrimiento superficial en las subparcelas con cobertura vegetal

En el Cuadro 8 se presentan los datos del escurrimiento superficial obtenidos en las subparcelas con cobertura vegetal de cada uno de los cultivos según las etapas de medición. A este cuadro se le añadieron los datos de cobertura vegetal, lo cual permite visualizar más claramente el comportamiento del escurrimiento superficial.

Cuadro 8. Ecurrimiento superficial y cobertura vegetal en subparcelas con cobertura vegetal, según días de desarrollo.

| Cultivo | | <u>Ecurrimiento superficial (mm) y</u> <u>Cobertura vegetal (%)</u> | | | |
|-------------------|--------------|--|-------|-------|-------|
| | | 15 | 30 | 50 | 65 |
| Maíz | Ecurrimiento | 50.1 | 38.3 | 44.5 | 64.5 |
| | Cobertura | 2.48 | 27.08 | 56.62 | 66.23 |
| Frijol | Ecurrimiento | 50.8 | 38.6 | 18.1 | 9.8 |
| | Cobertura | 5.18 | 17.69 | 75.42 | 92.47 |
| Calabacita | Ecurrimiento | 45.7 | 38.2 | 21.6 | 25.4 |
| | Cobertura | 1.12 | 16.21 | 63.45 | 82.68 |
| Avena | Ecurrimiento | 30.1 | 27.7 | 4.9 | 21.8 |
| | Cobertura | 53.77 | 74.13 | 93.21 | 94.68 |

En el cultivo de maíz, es notorio el hecho de que su cobertura vegetal únicamente mostrara efectos en reducir el escurrimiento superficial en sus primeros 30 días de desarrollo (Cuadro 8), periodo en el que se observó un coeficiente de escurrimiento de 0.48. Posteriormente, hasta los 65 días que duró el experimento, se dió un marcado aumento en el coeficiente de escurrimiento, siendo de 0.81, lo que representa un incremento del coeficiente de 0.33, respecto a lo observado a los 30 días.

Diversos autores han manifestado que el efecto de la cobertura vegetal es inversamente proporcional al escurrimiento superficial, esto es, a mayor cobertura vegetal menor escurrimiento superficial y viceversa (Eldridge y Greene, 1994, Snelder y Bryan 1995, Osuna y Esquivel 1996; Quinton *et al.* 1997 y Loch, 2000). Sin embargo, en este estudio se observó que a mayor cobertura vegetal se produjo mayor escurrimiento superficial (Figura 27a). Tales resultados se explican por la estructura física de la planta ya que después de los 50 días de desarrollo el cultivo de maíz alcanza una altura de 1.6 m y como la boquilla del simulador de lluvia se encuentra a 1.95 m, el follaje intercepta la lluvia y el agua se mueve entre el follaje y

desciende por el tallo hasta el suelo a poca velocidad, incrementando el escurrimiento superficial en la subparcela. El escurrimiento superficial fluye en pequeños canales formados al pie de las plantas hasta salir fuera de la subparcela. Además fue una lluvia de alta intensidad (80 mm h^{-1}) y como el cultivo se mantuvo limpio de malezas, no hubo rugosidad en el terreno, situación que favoreció el aumento del escurrimiento superficial a partir de los 50 días de desarrollo del maíz.

Lo que podría esperarse en el cultivo de maíz sería que la correlación entre la cobertura vegetal y el escurrimiento superficial se explicara por un modelo decreciente de acuerdo a otros autores citados con anterioridad. Para ello los datos se ajustaron aun modelo exponencial con R^2 de 0.16, omitiendo el dato de escurrimiento superficial obtenido a los 65 días (Figura 27a), dado que en las condiciones naturales (lluvia natural) no se da este proceso (aumento del escurrimiento con el aumento de la cobertura vegetal, que ya fue explicado anteriormente) (Figura 27b).

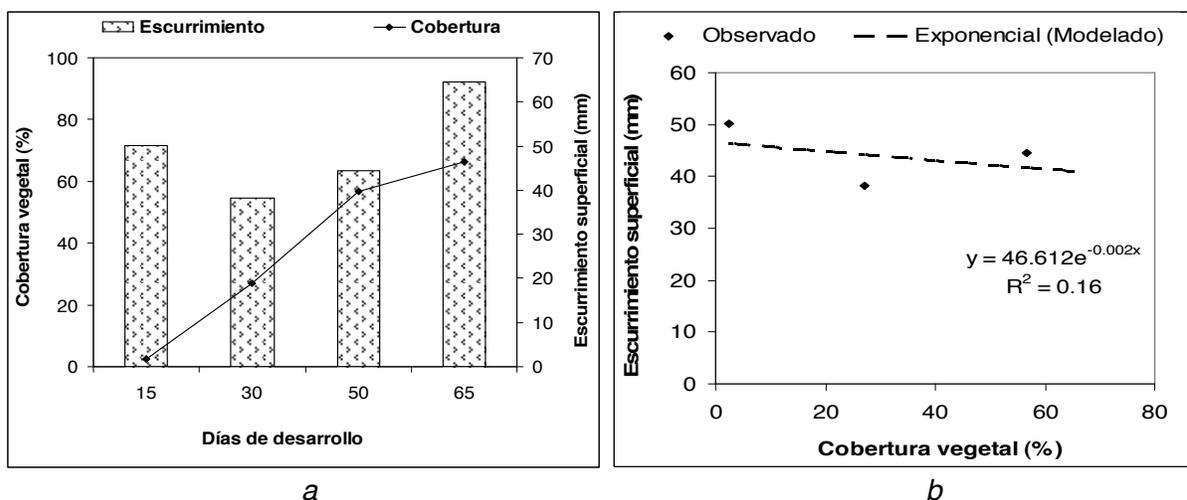


Figura 27. Cobertura vegetal y escurrimiento superficial en maíz.

En el cultivo de frijol se observó que a medida que se incrementa la cobertura vegetal se reduce en forma exponencial el escurrimiento superficial de 50.8 mm en los primeros 15 días a 9.8 mm a los 65 días de desarrollo, lo que muestra que el

coeficiente de escurrimiento pasa de 0.63 a 0.12. Lo anterior, indica la capacidad de la cobertura vegetal para reducir el escurrimiento superficial (Cuadro 8 y Figura 28a).

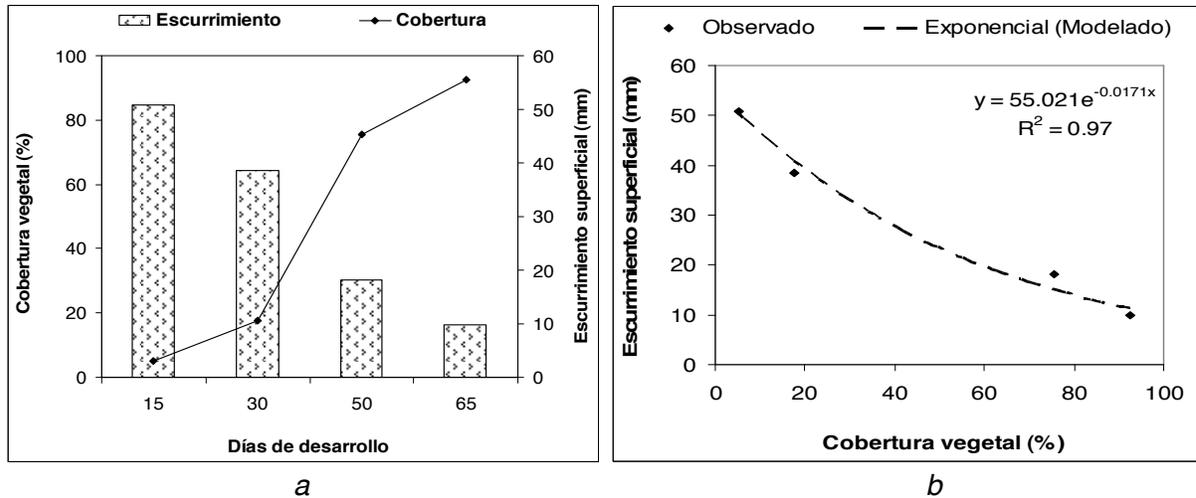


Figura 28. Cobertura vegetal y escurrimiento superficial en frijol.

La reducción del escurrimiento superficial por efecto de la cobertura vegetal del frijol se explica por un modelo exponencial, con el cual a partir del porcentaje de cobertura vegetal del cultivo se puede predecir el escurrimiento superficial (Figura 28b).

El cultivo de calabacita mostró la misma tendencia del frijol de reducir el escurrimiento superficial a medida que aumenta el porcentaje de cobertura vegetal. La reducción del escurrimiento superficial por efecto del follaje de la calabacita fue menor que en el frijol ya que pasó de un coeficiente de escurrimiento de 0.57 a los 15 días a 0.31 a los 65 días con un 1.12% y 82.68% de cobertura vegetal respectivamente (Figura 29a).

Existe una relación exponencial decreciente entre la cobertura vegetal de la calabacita y el escurrimiento superficial con tasa de cambio de 0.0083 que es inferior a la de 0.0171 encontrada para el cultivo de frijol (Figura 29b).

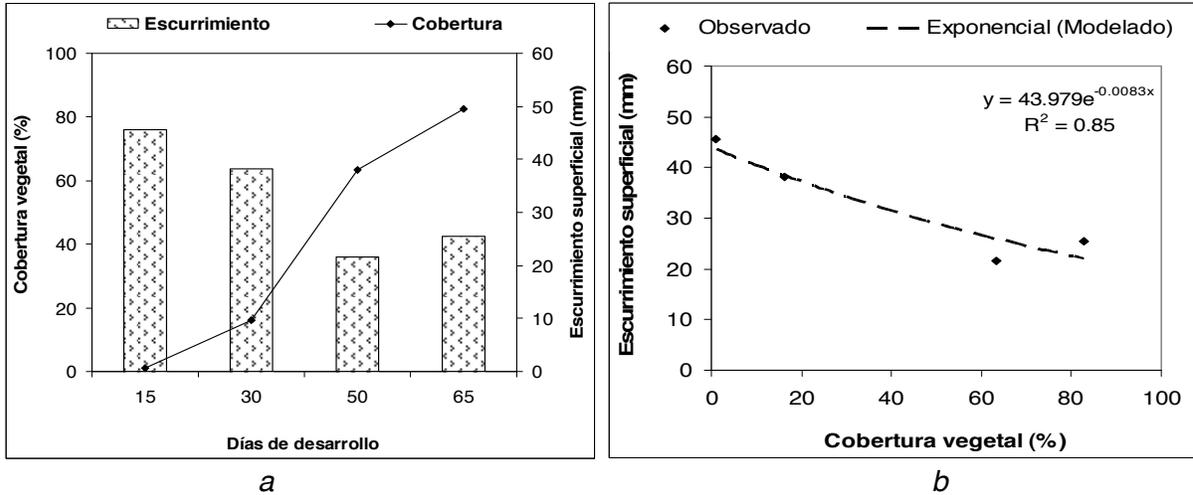


Figura 29. Cobertura vegetal y escurrimiento superficial en calabacita.

El efecto del porcentaje de la cobertura vegetal de la avena sobre la reducción del escurrimiento superficial es mayor en promedio que los cultivos de escarda ya que sus coeficientes de escurrimientos varían de 0.38 al inicio del ciclo de desarrollo del cultivo a 0.06 a los 50 días de desarrollo. El efecto de la cobertura vegetal de la avena para reducir el escurrimiento superficial sigue una función exponencial decreciente similar a la obtenida en los cultivos de escarda (Figura 30b). Cabe señalar que en este cultivo se omitió el dato de escurrimiento superficial obtenido a los 50 días ya que se consideró erróneo, posiblemente por error en la toma de muestra.

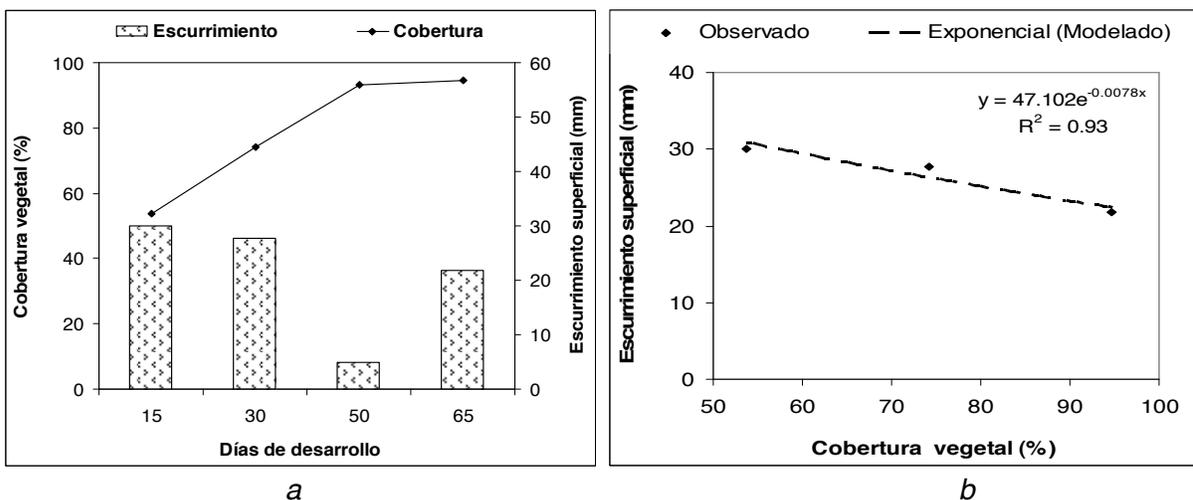


Figura 30. Cobertura vegetal y escurrimiento superficial en avena.

Esta información permite inferir que el cultivo tupido, por su mayor porcentaje de cobertura vegetal y desarrollo radical al inicio de su ciclo, aumenta la infiltración del agua en el suelo en comparación con los cultivos de escarda, lo que permite recomendar a los cultivos tupidos como una practica vegetativa para reducir los escurrimientos superficiales.

El análisis de las tasas de cambio del escurrimiento superficial (b), a partir de los modelos encontrados, permite apreciar la magnitud con la cual la cobertura vegetal de cada cultivo reduce dicho escurrimiento. Dado su comportamiento, se han comparado los cultivos de maíz, frijol, calabacita y avena. En el Cuadro 9 se observa que al inicio del ciclo, el escurrimiento (representado por el valor de la ordenada al origen) fue mayor en frijol, seguido por la avena, el maíz y la calabacita. El frijol mostró la mayor tasa de decrecimiento (representada por el valor absoluto de la pendiente del modelo), mientras que la calabacita y la avena tuvieron tasas de decrecimiento similares y la menor tasa de decrecimiento del escurrimiento superficial la tuvo el maíz. Esto indica que el frijol es el cultivo más eficiente en reducir el escurrimiento superficial, seguido de la avena, la calabacita y por ultimo el maíz.

Cuadro 9. Escurrimiento superficial en subparcelas con cobertura vegetal, al inicio del desarrollo de los cultivos y sus tasas de decrecimiento, de acuerdo al comportamiento modelado.

| Cultivo | Modelo | a (ordenada al origen) | b (pendiente) | R² |
|-------------------|--------------------------|-------------------------------|-----------------------|----------------------|
| Maíz | $y = 46.612e^{-0.002x}$ | 46.612 | -0.002 | 0.16 |
| Frijol | $y = 55.021e^{-0.0171x}$ | 55.021 | -0.0171 | 0.97 |
| Calabacita | $y = 43.979e^{-0.0083x}$ | 43.979 | -0.0083 | 0.85 |
| Avena | $y = 47.102e^{-0.0078x}$ | 47.102 | - 0.0078 | 0.93 |

En los párrafos anteriores se ha discutido que para un periodo experimental de 65 días todos los cultivos validan la idea general de que a mayor cobertura vegetal menor escurrimiento superficial. Parece ser que en el frijol, no solamente una mayor

cobertura vegetal es el principal responsable de un menor escurrimiento superficial; la variedad utilizada en este experimento es de hábito de crecimiento indeterminado semipostrado, estando su follaje en contacto directo con el suelo, lo cual provoca que tenga mayor capacidad de interceptación de la lluvia y constituya una barrera física eficaz al tránsito del escurrimiento superficial. En contraste con los otros tres cultivos que si bien aumentaron en cobertura vegetal, la misma no está en contacto directo con el suelo.

5.4.2. Escurrimiento superficial en las subparcelas sin cobertura (raíces)

Para evaluar el posible impacto del sistema radical sobre el escurrimiento superficial a algunas subparcelas experimentales se les cortó la cobertura vegetal con tijeras como se explicó en la metodología de trabajo y se le aplicó lluvia simulada al suelo desnudo con las raíces del cultivo de referencia. Los datos del escurrimiento superficial obtenidos en las subparcelas sin cobertura (raíces) y la DLR de cada uno de los cultivos en las diferentes etapas de medición se muestran en el Cuadro 10.

Cuadro 10. Escurrimiento superficial y DLR en subparcelas sin cobertura (raíces), según días de desarrollo.

| Cultivo | | Escurrimiento superficial (mm) y DLR (km m⁻³) | | | |
|-------------------|---------------|---|-----------|-----------|-----------|
| | | 15 | 30 | 50 | 65 |
| Maíz | Escurrimiento | 44.7 | 47.7 | 34.3 | 37.4 |
| | DLR | 2.4 | 4.6 | 5.1 | 37.5 |
| Frijol | Escurrimiento | 37.7 | 42.6 | 36.8 | 42.5 |
| | DLR | 0.3 | 1.6 | 4.3 | 8.6 |
| Calabacita | Escurrimiento | 44.0 | 41.9 | 35.1 | 40.6 |
| | DLR | 0.2 | 0.8 | 4.4 | 6.8 |
| Avena | Escurrimiento | 44.9 | 42.5 | 42.9 | 43.8 |
| | DLR | 6.6 | 72.7 | 99.2 | 136.2 |

El escurrimiento superficial en las subparcelas sin cobertura (raíces) del cultivo de maíz en las cuatro fechas de medición tuvo una ligera reducción ya que el coeficiente de escurrimiento fue de 0.56 a los 15 días y de 0.47 a los 65 días de desarrollo, situación que podría explicarse porque el sistema radical del maíz creció en la ultima etapa aumentando la capacidad de infiltración del agua en el suelo y de esta manera se redujo ligeramente el escurrimiento superficial (Figura 31).

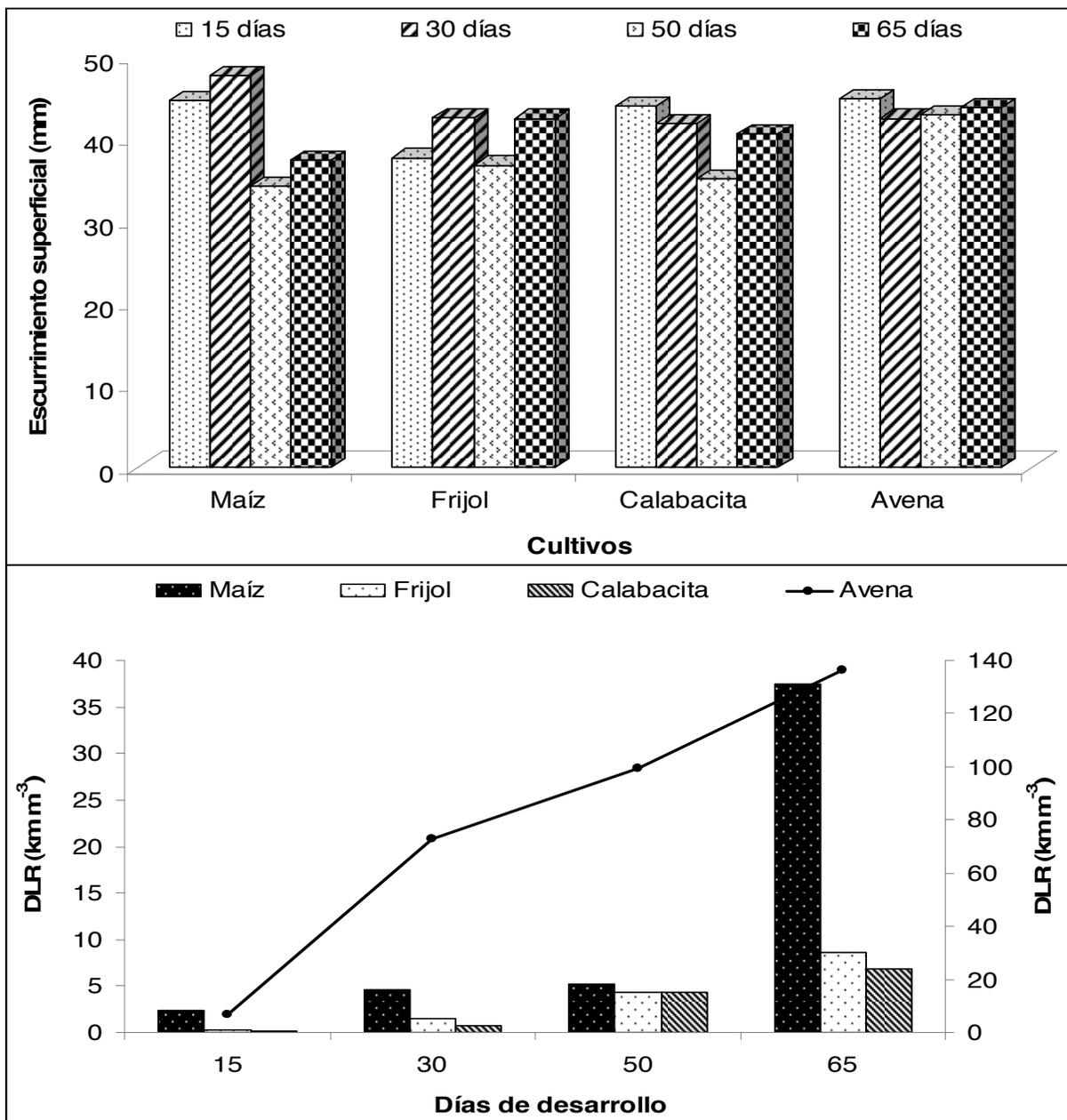


Figura 31. Ecurrimiento superficial y DLR en los cultivos bajo estudio.

En las subparcelas de frijol y calabacita el escurrimiento superficial fue similar en las cuatro fechas de medición con un coeficiente promedio de escurrimiento de 0.50. Esto indica que a pesar que la DLR estuvo creciendo en el tiempo de desarrollo del cultivo no afectó el escurrimiento superficial y los cambios a la baja y la alza del escurrimiento superficial medido en las subparcelas solo pueden explicarse por la metodología de investigación más que por el efecto de las raíces para reducir el escurrimiento superficial en estos cultivos de escarda (Figura 31). Por lo que las raíces, aún a altas DLR no son un factor que determine una reducción sobre el escurrimiento superficial como lo sugieren Bui y Box (1993).

En las subparcelas de avena se tuvieron coeficientes de escurrimiento muy similares durante todo el periodo experimental siendo un promedio de 0.54, con lo que se establece claramente el poco efecto del crecimiento de las raíces sobre el escurrimiento superficial (Cuadro 10 y Figura 31). Este comportamiento se atribuye a que las raíces en crecimiento ocupan el espacio que estuvo ocupado por el espacio poroso y partículas del suelo. Dado que el diámetro de raíz es usualmente más grande que el diámetro de poros, las partículas de suelo son empujadas hacia un lado y la densidad aparente del suelo aumenta cerca de donde crece la raíz (Glinski y Lipiec, 1990) provocando que la cantidad de escurrimiento superficial se mantenga igual o tienda a aumentar (Figura 31).

5.5. Comparación del escurrimiento superficial en subparcelas con cobertura vegetal y sin cobertura (raíces)

En los cultivos de escarda (maíz, frijol y calabacita) se presentó mayor escurrimiento superficial a los 15 días de desarrollo en las subparcelas con cobertura vegetal que en las subparcelas sin cobertura (raíces), circunstancia que puede explicarse por posibles errores en la colocación del simulador de lluvia, pues al momento de aplicar lluvia simulada este mojaba más a las subparcelas con cobertura vegetal. No sucedió lo mismo en el cultivo tupido, ya que a los 15 días de desarrollo con una altura de plantas de 20 cm, presentó hojas con traslape y una cobertura vegetal de 53.77%, la cual amortiguó el impacto de las gotas de lluvia, retuvo el

escurrimiento superficial y favoreció la infiltración del agua en el suelo, lo que se reflejó en un bajo coeficiente de escurrimiento de 0.37 en comparación al coeficiente de escurrimiento de 0.56 registrado en la subparcela sin cobertura (raíces).

En los siguientes periodos de desarrollo (con excepción del cultivo de maíz, situación que ya fue explicada) se presentó mayor escurrimiento superficial en las subparcelas sin cobertura (raíces) que en las subparcelas con cobertura vegetal (Figura 32). Lo cual demuestra la capacidad que tiene la cobertura vegetal tanto de los cultivos de escarda como del cultivo tupido para reducir el escurrimiento superficial y propiciar un aumento en la infiltración de agua en el suelo, con lo que podría esperarse una menor pérdida de suelo.

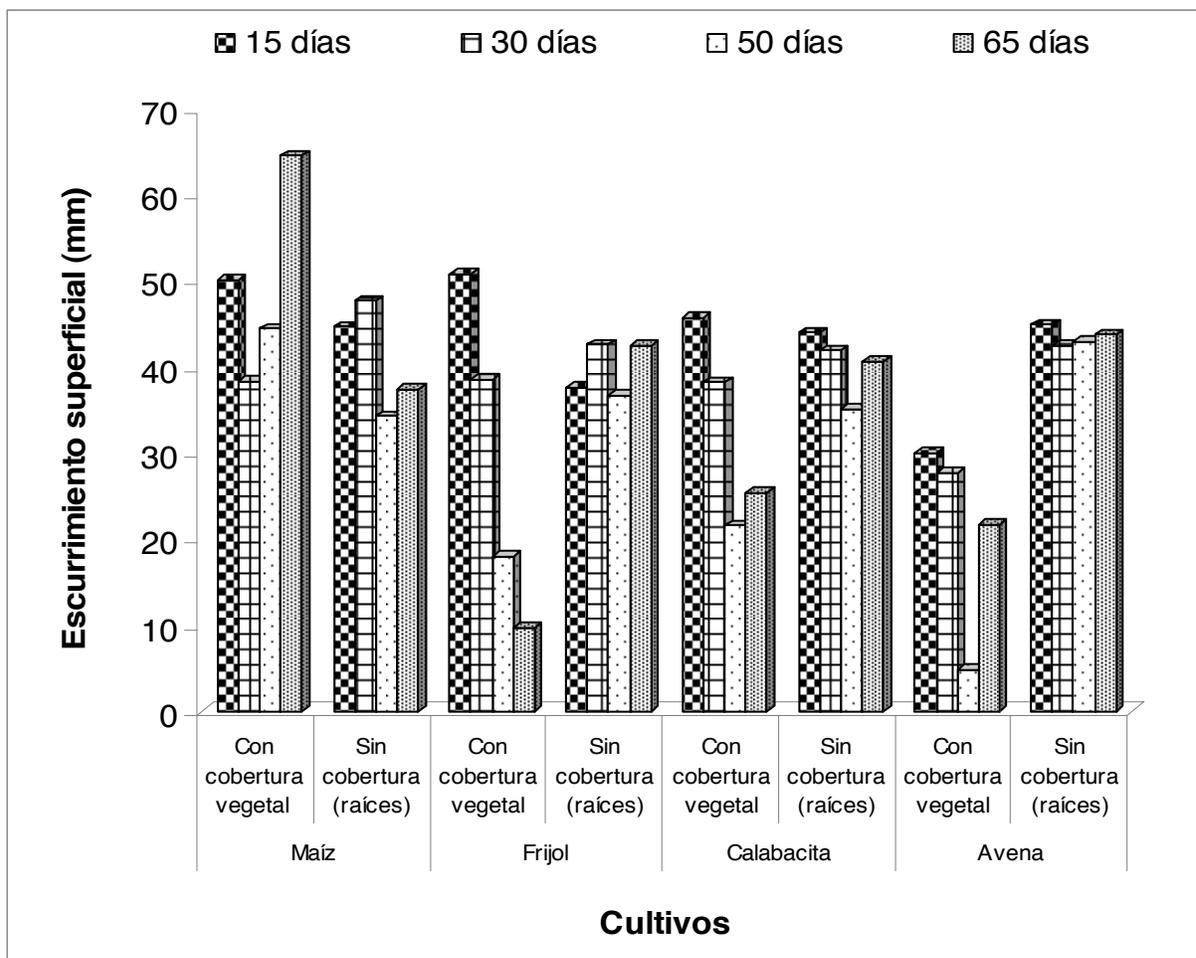


Figura 32. Escurrimiento superficial obtenido en subparcelas con cobertura vegetal y sin cobertura (raíces), según días de desarrollo.

Para tratar de separar el efecto de la cobertura vegetal y el sistema radical sobre el escurrimiento superficial, se comparó el escurrimiento superficial obtenido en las subparcelas con cobertura vegetal y sin cobertura (raíces) y las diferencias promedio se muestran en la Figura 33. La influencia de la cobertura vegetal sobre la reducción del escurrimiento superficial promedio es notoria para los cultivos de frijol, calabacita y mucho más evidente en avena, en comparación con las subparcelas sin cobertura (raíces), ya que estas no tienen la misma capacidad para retener el flujo superficial. En contraste destaca que en el cultivo de maíz existe un mayor escurrimiento superficial en las subparcelas con cobertura vegetal que en las subparcelas sin cobertura (raíces) debido a lo explicado con anterioridad.

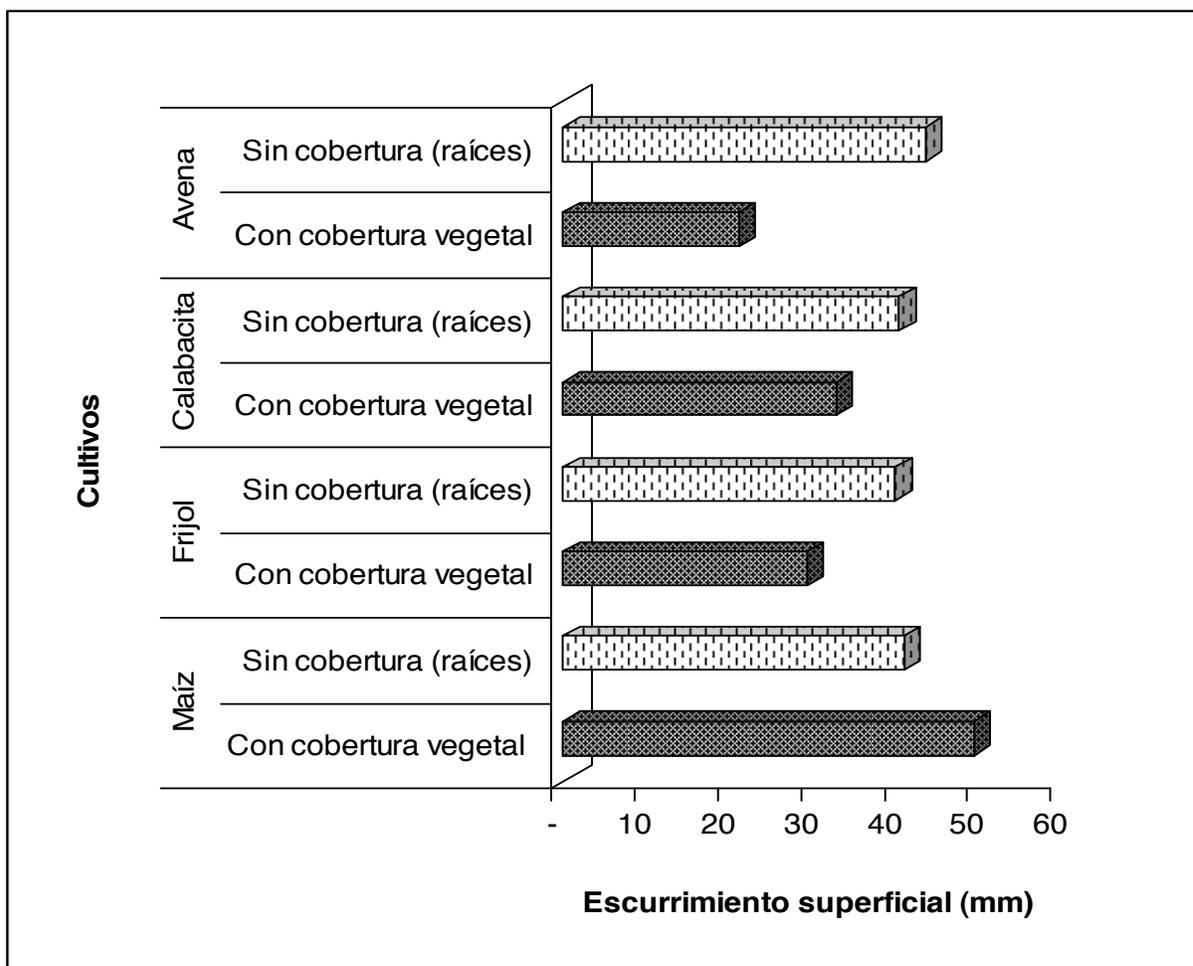


Figura 33. Escurrecimiento superficial promedio en subparcelas con cobertura vegetal y sin cobertura (raíces) de los cultivos bajo estudio.

En la Figura 33 se observa que el escurrimiento superficial promedio durante todo el periodo experimental en las subparcelas con cobertura vegetal fue de 33.13 mm lo cual indica que se infiltró el 58.6% de 80 mm que se aplicaron en la lluvia simulada, en tanto que en las subparcelas sin cobertura (raíces) el escurrimiento promedio fue de 41.21 mm, infiltrándose el 48.5%. Se evidencia así el efecto de la cobertura vegetal en reducir el escurrimiento superficial. Sin embargo se observa una alta infiltración en las subparcelas sin cobertura (aproximadamente la mitad de la lluvia aplicada. Aunque no se hicieron mediciones en subparcelas de suelo desnudo esta alta infiltración no se considera un efecto exclusivo de las raíces sino un efecto combinado a la textura del suelo. El suelo donde se realizó el estudio presentó una textura migajón arenosa la cual permite una alta infiltración del agua en la superficie del suelo.

5.6. Pérdida de suelo

5.6.1. Pérdida de suelo en subparcelas con cobertura vegetal

De los resultados encontrados se observa que en las subparcelas con cobertura vegetal, la pérdida de suelo tendió a disminuir en los primeros 50 días de desarrollo. En las subparcelas con cobertura vegetal de frijol y de calabacita esta tendencia se mantuvo durante los 65 días. No ocurrió lo mismo en las subparcelas con maíz y avena donde la pérdida de suelo aumentó después de los 50 días, lo cual se explica porque en el mismo periodo (50 a 65 días) aumentó el escurrimiento superficial en ambos tratamientos.

Para el cultivo de maíz en la Figura 34a puede observarse que una mayor cobertura vegetal no implicó una reducción en el escurrimiento superficial, como tampoco un mayor escurrimiento superficial implicó mayor pérdida de suelo, en cambio una mayor cobertura vegetal sí implicó una reducción en la pérdida de suelo. La explicación a este hecho tiene que ver con que, si bien la estructura de crecimiento del maíz concentra el escurrimiento y lo hace descender a baja velocidad

por los tallos, este cae y golpea al suelo que esta al pie de las plantas de maíz, en donde existe una gran cantidad de raíces gruesas fibrosas que amortiguan el golpe del agua, provocando que se de una disminución en la pérdida de suelo conforme avanzan los días de desarrollo.

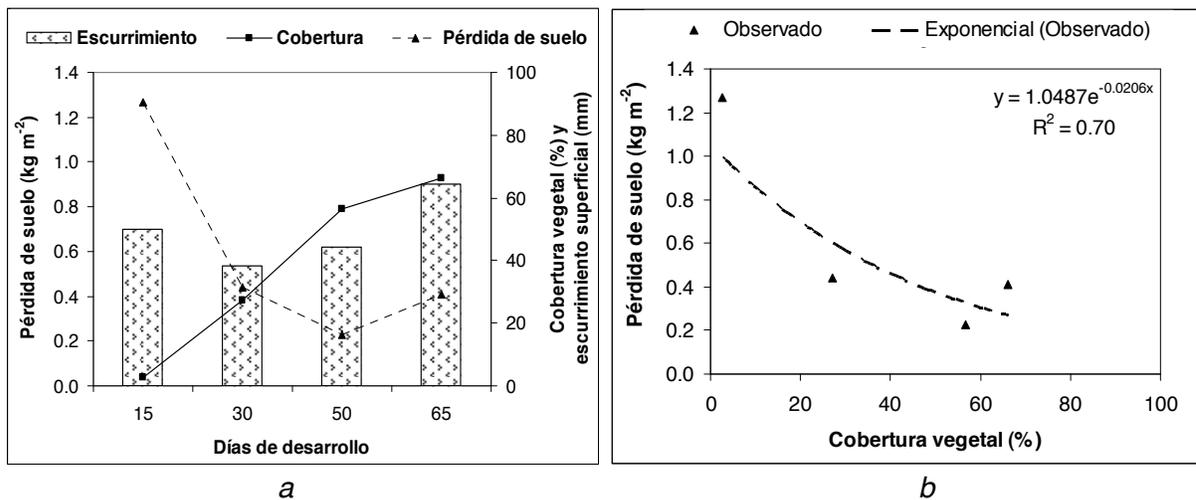


Figura 34. Pérdida de suelo y cobertura vegetal en maíz.

En el cultivo de maíz existe una correlación exponencial negativa entre la pérdida de suelo y la cobertura vegetal, lo que indica que la pérdida de suelo disminuye en la medida en que aumenta la cobertura vegetal (Figura 34b). Estos resultados coinciden con los de Gutierrez y Hernandez (1996), quienes mencionan que la vegetación es el principal factor que influye en la disminución del escurrimiento superficial y la pérdida de suelo, encontrando una correlación negativa entre la pérdida de suelo y la cobertura vegetal con un R^2 igual a 0.73.

Para el caso del frijol (Figura 35), a mayor cobertura vegetal se presenta menor pérdida de suelo lo cual se atribuye a que la cobertura vegetal protege al suelo contra el impacto de las gotas de lluvia y su capacidad de dispersión y a que disminuye el escurrimiento superficial. Lo anterior coincide con lo reportado por Carroll *et al.* (1997) y Carroll *et al.* (2000) quienes experimentalmente determinaron que el incremento de la cobertura vegetal en un terreno agrícola reduce la erosión progresivamente.

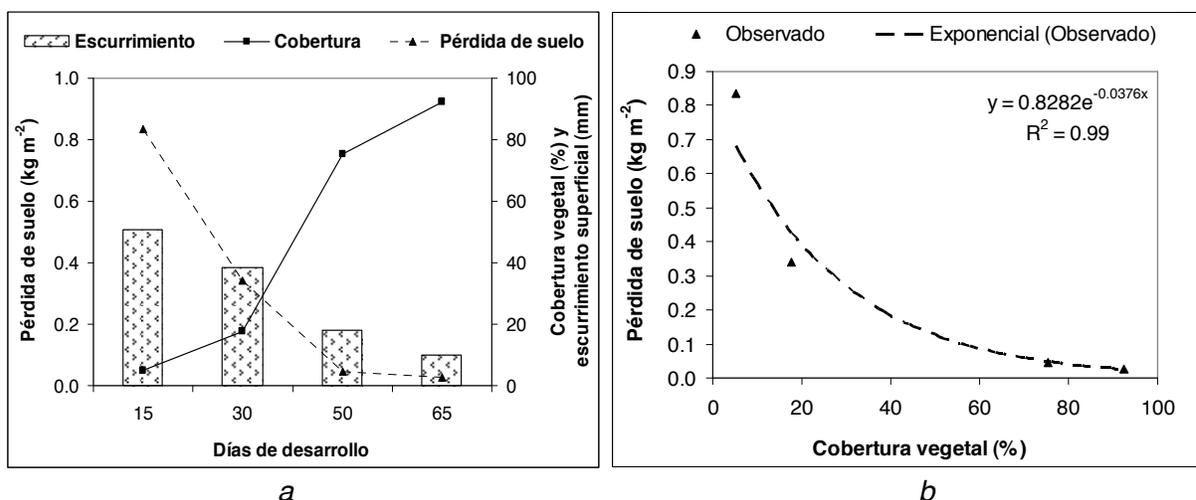


Figura 35. Pérdida de suelo y cobertura vegetal en frijol.

La variación de la cobertura vegetal del frijol depende de la densidad de siembra y su forma de crecimiento favorece la formación de una cobertura que protege al suelo de la energía erosiva del impacto de las gotas de lluvia, aumenta la infiltración y reduce el escurrimiento superficial. En el cultivo de frijol existe una alta correlación exponencial negativa entre la pérdida de suelo y la cobertura vegetal con un coeficiente de determinación de 0.99 (Figura 35b).

En cultivo de la calabacita (Figura 36a) a mayor porcentaje de cobertura vegetal hubo menor pérdida de suelo lo cual esta asociado con el escurrimiento superficial. La correlación entre la cobertura vegetal y la pérdida de suelo responde a un modelo exponencial con un $R^2 = 0.97$ (Figura 36b). Los resultados son similares a los encontrados por Quinton *et al.* (1997) y por Loch (2000) quienes mencionan que a mayor cobertura vegetal se reduce en gran medida la pérdida de suelo, ya que mediante un modelo exponencial con R^2 de 0.60 y de 0.99, respectivamente describieron la relación negativa que guarda la cobertura vegetal y la pérdida de suelo.

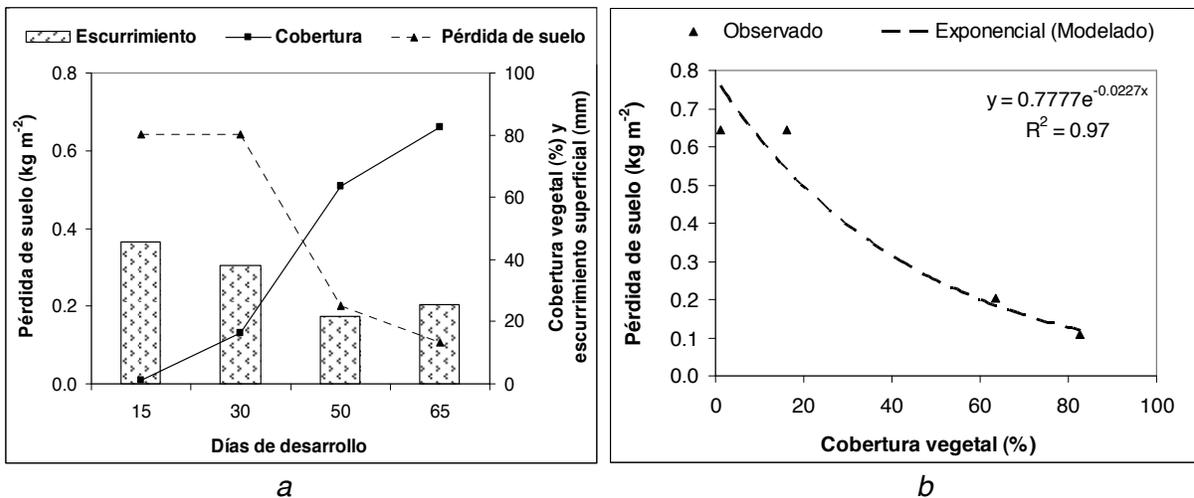


Figura 36. Pérdida de suelo y cobertura vegetal en calabacita.

La avena fue el cultivo que, por su cobertura vegetal y sistema radical, produjo las menores pérdidas de suelo, lo que indica que los cultivos tupidos son más eficientes para proteger el suelo que los cultivos de escarda (Figura 37a).

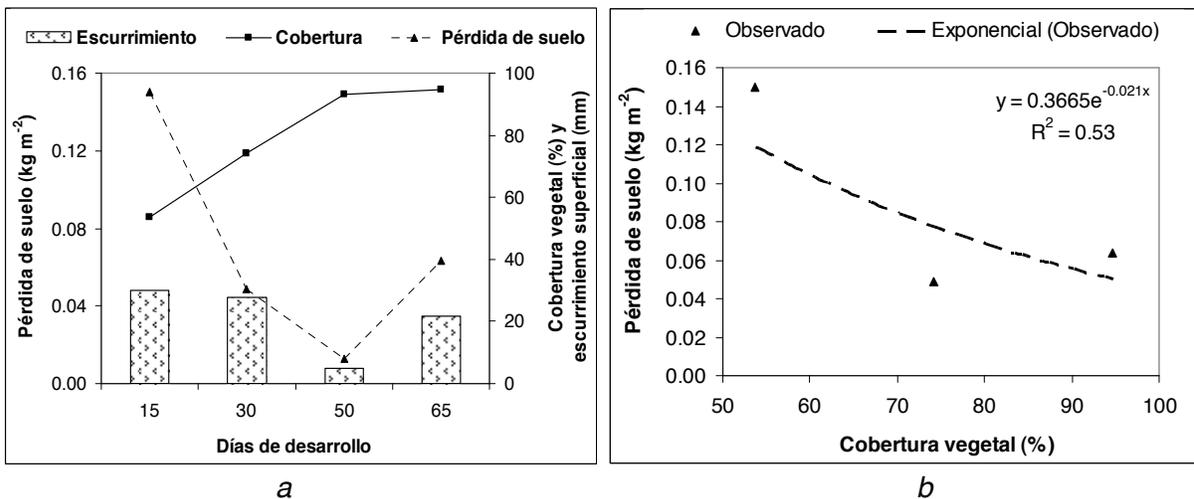


Figura 37. Pérdida de suelo y cobertura vegetal en avena.

En este cultivo se omitió el dato de pérdida de suelo obtenido a los 50 días (Figura 37a) ya que se consideró erróneo, posiblemente por error en la toma de muestra. Se encontró relación exponencial negativa entre la cobertura vegetal y la pérdida de suelo que se explica con un modelo exponencial decreciente con coeficiente de determinación de $R^2 = 0.53$ (Figura 37b). De manera similar estos

resultados corresponden a lo reportado por McIvor *et al.* (1995), quien encontró una relación exponencial negativa entre la cobertura vegetal y la pérdida de suelo ($R^2 = 0.95$). Lo que demuestra un vez más la idea general sustentada por diversos autores (Wilcox y Wood, 1989; Blackburn *et al.* 1992; Eldridge y Koen, 1993; Snelder y Bryan, 1995), en el sentido de que a mayor cobertura vegetal menor pérdida de suelo.

Destaca que todos los cultivos presentaron un modelo exponencial decreciente que permite, a partir del porcentaje de cobertura vegetal, predecir la pérdida de suelo a nivel de subparcela (Cuadro 11). La comparación de los valores de la ordenada al origen de los modelos obtenidos indican que el cultivo tupido protege más al suelo en los primeros períodos de desarrollo que los cultivos de escarda. De los cultivos de escarda el que menos protege al suelo es el maíz, seguido por el frijol y la calabacita.

La tasa de reducción de la pérdida de suelo (representada por el valor absoluto de la pendiente) relacionada al incremento de la cobertura vegetal, muestra que el cultivo del frijol protege más al suelo del proceso erosivo en comparación a los otros cultivos, seguido de la calabacita, la avena y el maíz (Cuadro 11).

Cuadro 11. Pérdida de suelo en subparcelas con cobertura vegetal, al inicio del desarrollo de los cultivos y sus tasas de decrecimiento, de acuerdo al comportamiento modelado.

| Cultivo | Modelo | a (ordenada al origen) | b (pendiente) | R² |
|-------------------|--------------------------|-------------------------------|----------------------|----------------------|
| Maíz | $y = 1.0487e^{-0.0206x}$ | 1.0487 | - 0.0206 | 0.70 |
| Frijol | $y = 0.8282e^{-0.0376x}$ | 0.8282 | - 0.0376 | 0.99 |
| Calabacita | $y = 0.7777e^{-0.0227x}$ | 0.7777 | - 0.0227 | 0.97 |
| Avena | $y = 0.3665e^{-0.021x}$ | 0.3665 | - 0.021 | 0.53 |

5.6.1.1. Correlación entre la pérdida de suelo y el escurrimiento superficial en subparcelas con cobertura vegetal

Se hicieron análisis de regresión lineal entre el escurrimiento superficial y la pérdida de suelo de cada uno de los cultivos a manera de evaluar el grado de asociación entre la pérdida de suelo y el factor de transporte de las partículas del suelo que es el escurrimiento superficial (Figura 38).

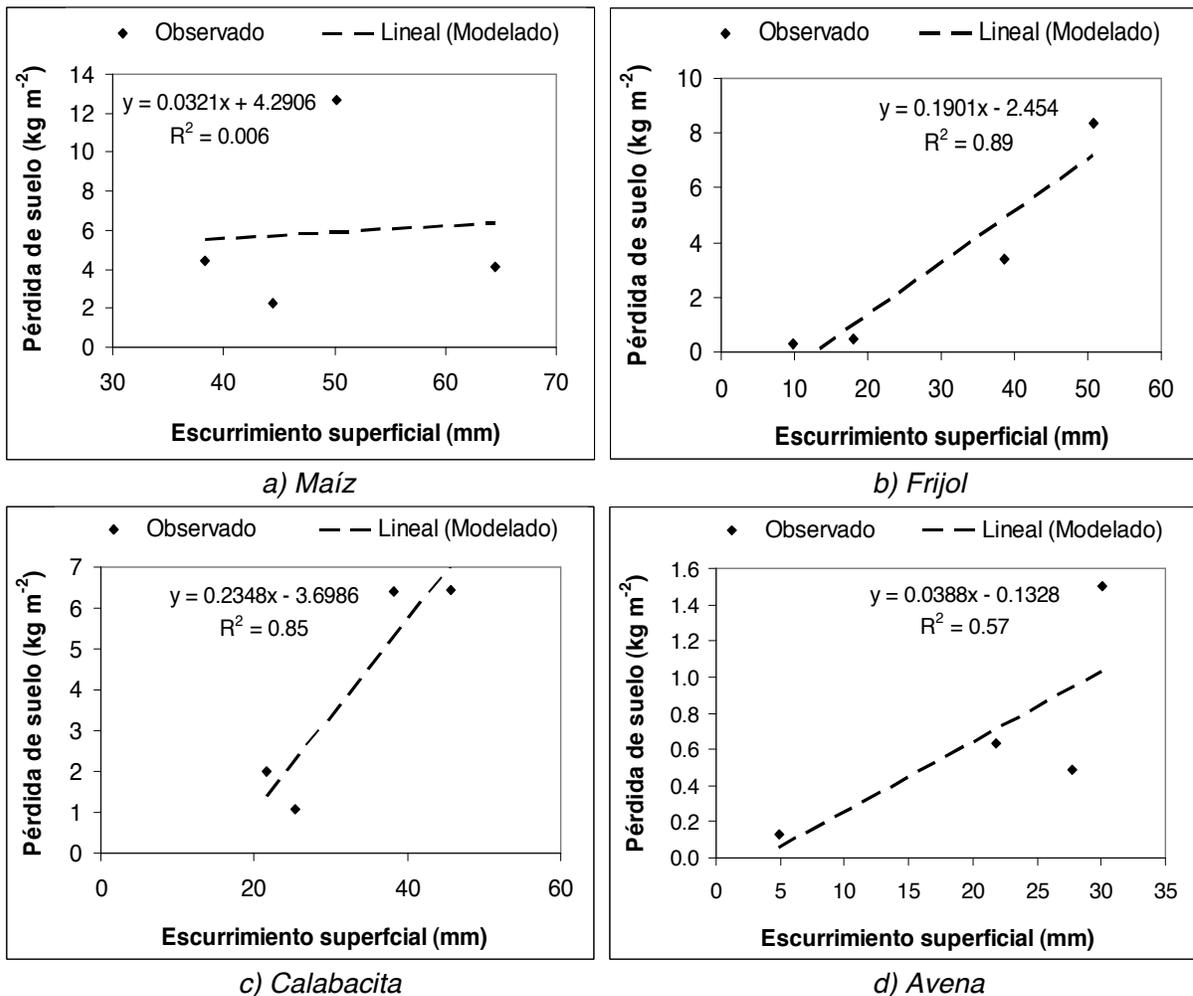


Figura 38. Modelos de regresión entre la pérdida de suelo y el escurrimiento superficial en subparcelas con cobertura vegetal.

Para el cultivo del maíz no existe una correlación entre el escurrimiento superficial y la pérdida de suelo, debido a los cambios en el escurrimiento superficial

medido en la subparcelas de escurrimiento previamente discutidos. Para los otros tres cultivos el modelo lineal define mejor la relación ya que a medida que aumenta el escurrimiento superficial se incrementa la capacidad de transporte del flujo superficial y aumenta la pérdida de suelo, en el cultivo de avena el modelo muestra un ajuste medio, en comparación con los cultivos de frijol y calabacita donde los modelos lineales de predicción alcanzaron mejores coeficientes de determinación (Figura 38).

5.6.2. Pérdida de suelo en subparcelas sin cobertura (raíces)

El desarrollo radical de los diferentes cultivos y en toda la profundidad del suelo muestreado (0-35 cm) durante el desarrollo de los cultivos (hasta 65 días) muestra un crecimiento hacia las capas inferiores y en los primeros 10 cm se concentra el 44% del sistema radical, en promedio para todos los cultivos (Anexo A).

Para comparar el impacto del sistema radical de todas las capas (DLR total) con la DLR de la capa de 0-10 cm de suelo, se correlacionó la DLR total con la pérdida de suelo encontrándose relaciones exponenciales decrecientes, todas similares a las encontradas en la capa de 0-10 cm (Figuras 39, 40, 41 y 42b), lo que confirma que dicha capa, por estar expuesta a los procesos de remoción y transporte causados por los agentes erosivos (precipitación y escurrimiento), reduce la erosión del suelo en mayor proporción que la protección que al suelo le da todo el sistema radical de las plantas.

Continuando con el análisis de la primera capa de raíces (0-10 cm), para el caso del maíz, (Figura 39a) puede verse una relación proporcional negativa entre la DLR con el escurrimiento superficial y con la pérdida de suelo; esto es, a mayor densidad longitudinal de raíces del cultivo (DLR), se reduce el escurrimiento superficial como ya se había reportado y la pérdida de suelo. Lo anterior, indica que no solo la cobertura vegetal protege al suelo contra la erosión, sino que también el sistema radical retiene el suelo en contra de la capacidad de transporte del flujo superficial.

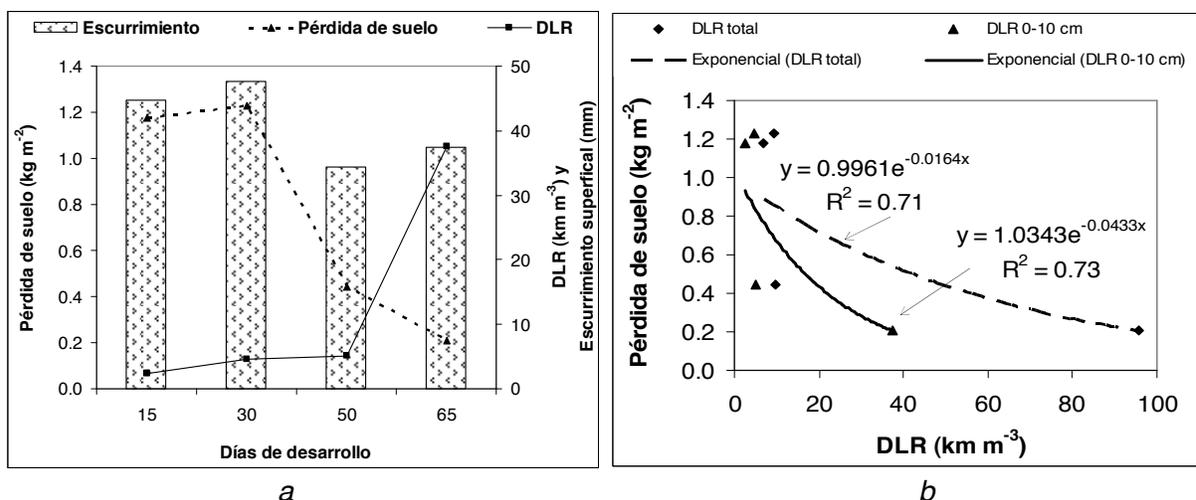


Figura 39. Pérdida de suelo y DLR en maíz.

Estos resultados coinciden con los de Mamo y Bubener (2001b) quienes mencionan que la pérdida de suelo en maíz se reduce en forma exponencial a medida que existe un incremento en la densidad longitudinal de raíces (DLR). Una relación similar fue observada en estudios de laboratorio realizados con pasto ryegrass por Mamo y Bubener (2001a). Por su parte Ghidey y Alberts (1997) también encontraron una relación exponencial entre la pérdida de suelo y dos parámetros de las raíces (masa y longitud de raíces muertas).

El modelo exponencial ajustó los datos de DLR y pérdida de suelo con un buen coeficiente de determinación ($R^2 = 0.73$) que indica que las raíces del maíz por si solas ayudan a reducir el proceso erosivo del suelo (Figura 39b).

En el cultivo de frijol los resultados obtenidos no manifiestan una relación clara entre la DLR, el escurrimiento superficial y la pérdida de suelo (Figura 40a). En la primera etapa de medición, con una escasa DLR (0.3 km m^{-3}) hubo un escurrimiento superficial y pérdida de suelo similar a los encontrados a los 50 días, cuando se presentó una mayor DLR (8.6 km m^{-3}). Lo anterior indica que el sistema radicular del frijol no tuvo efecto en la retención del suelo ya que no tuvo impacto en la reducción del escurrimiento superficial, que es uno de los factores causales de la pérdida de suelo.

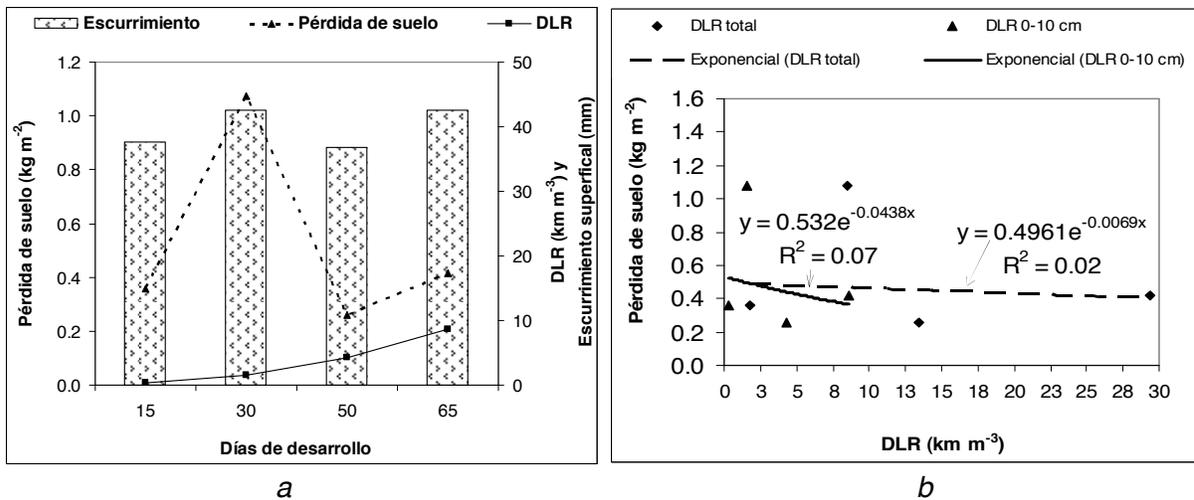


Figura 40. Pérdida de suelo y DLR en frijol.

El análisis de regresión exponencial entre el DLR y la pérdida de suelo muestra un bajo ajuste ($R^2 = 0.07$) lo que indica que los cambios en el escurrimiento superficial y la pérdida de suelo medidos en forma multitemporal, responden al método experimental más que al efecto del sistema radical para reducir estas variables (Figura 40b).

En las subparcelas con raíces de calabacita (Figura 41a), se observa que tanto el escurrimiento superficial como la pérdida de suelo presentaron una relación proporcional negativa con tendencia a disminuir conforme aumentaba la DLR, aunque a los 65 días de desarrollo, con la mayor DLR (6.8 km m^{-3}), se encontró que el escurrimiento superficial y la pérdida de suelo aumentaron (de 35.1 mm a 40.6 mm y de 0.19 kg m^{-2} a 0.62 kg m^{-2} , de los 50 a los 65 días de desarrollo, respectivamente). Aunque con un R^2 bajo de 0.26, el análisis de regresión exponencial muestra que la pérdida de suelo disminuye conforme aumenta la DLR (Figura 41b).

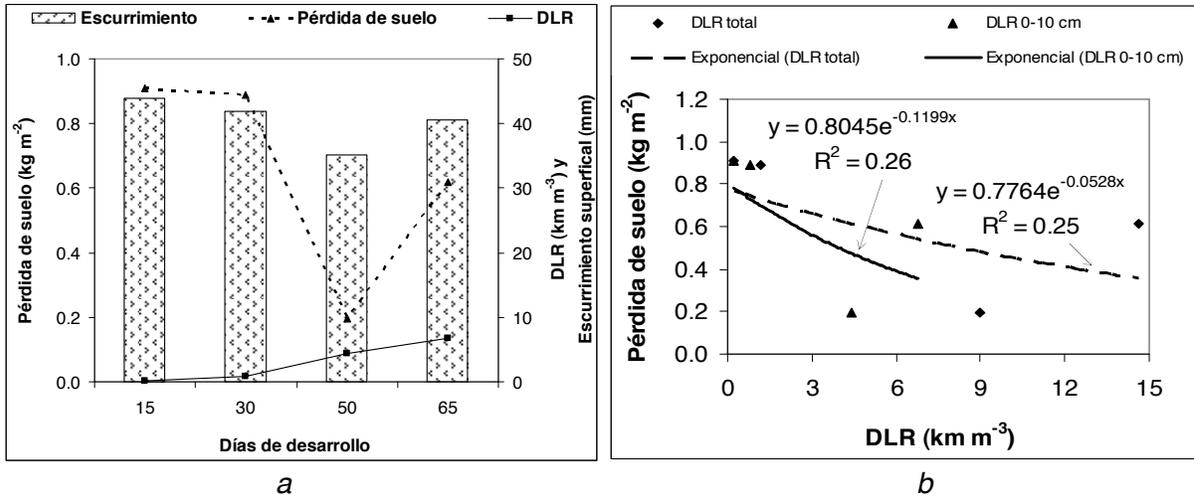


Figura 41. Pérdida de suelo y DLR en calabacita.

En el cultivo de la avena no se presenta un cambio significativo en el escurrimiento superficial conforme transcurrieron los días de desarrollo y aumentó la densidad longitudinal de raíces (DLR) (Figura 42a).

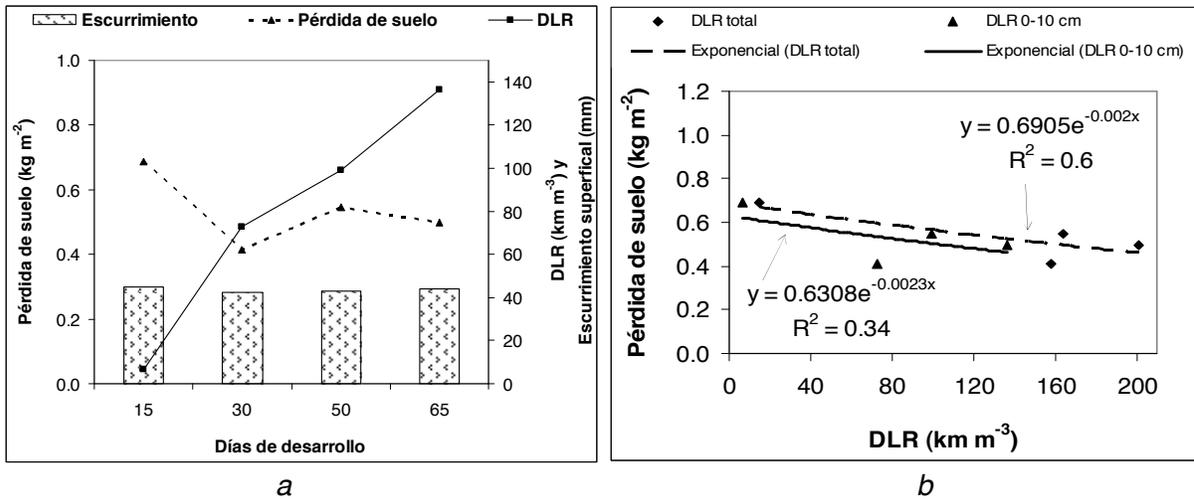


Figura 42. Pérdida de suelo y DLR en avena.

En este cultivo se aprecia una tendencia a disminuir la pérdida de suelo conforme aumenta la DLR, presentando una relación exponencial negativa con un coeficiente de determinación de 0.34 (Figura 42b).

Del análisis anterior entre la DLR y la pérdida de suelo de cada cultivo, se observa que las raíces tienen un efecto menor en reducir la pérdida de suelo, que la cobertura vegetal. De acuerdo con Gyssels *et al.* (2006), bajo condiciones de campo, el efecto de las raíces sobre la pérdida de suelo puede ser menor al predicho por las ecuaciones que se han generado a partir de experimentos en laboratorio donde se trabaja bajo condiciones controladas. Sin embargo, en condiciones de campo, Mamo y Bubenzer (2001b), y en condiciones de laboratorio, Mamo y Bubenzer (2001a), y De Baets *et al.* (2006) encontraron que la pérdida de suelo se reduce con el aumento de la DLR.

5.6.2.1. Correlación entre la pérdida de suelo y el escurrimiento superficial en subparcelas sin cobertura (raíces)

La relación entre el escurrimiento superficial y la pérdida de suelo de cada uno de los cultivo muestra una relación lineal positiva en todas las subparcelas sin cobertura vegetal (raíces), siendo el coeficiente de determinación (R^2) en calabacita de 0.95, en maíz de 0.84, en avena de 0.76 y en frijol de 0.49. (Figura 43).

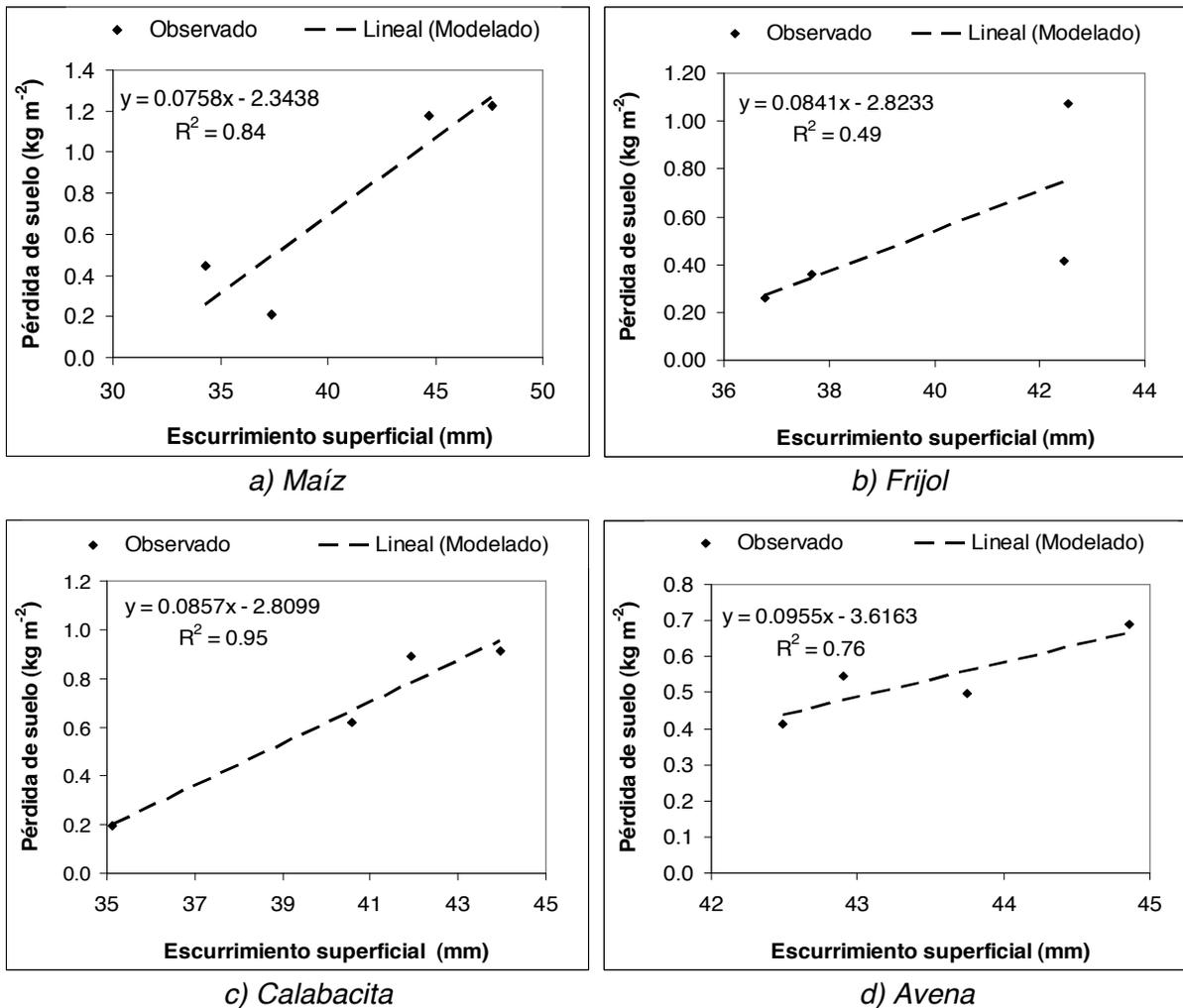


Figura 43. Modelos de regresión entre la pérdida de suelo y la DLR en subparcelas sin cobertura (raíces).

5.7. Comparación de la pérdida de suelo en subparcelas con cobertura vegetal y sin cobertura (raíces)

Las mediciones realizadas de la pérdida de suelo cuando las subparcelas experimentales contaron con la cobertura vegetal de los cultivos y cuando esta fue retirada, son presentadas en el Cuadro 12.

Cuadro 12. Pérdida de suelo obtenida en subparcelas con cobertura vegetal y sin cobertura (raíces), según días de desarrollo.

| Cultivo | Subparcela | <u>Pérdida de suelo (kg m⁻²)</u> | | | | |
|-------------------|------------------------|---|------|------|------|----------|
| | | 15 | 30 | 50 | 65 | Promedio |
| Maíz | Con cobertura vegetal | 1.27 | 0.44 | 0.23 | 0.41 | 0.59 |
| | Sin cobertura (raíces) | 1.18 | 1.23 | 0.44 | 0.21 | 0.77 |
| Frijol | Con cobertura vegetal | 0.83 | 0.34 | 0.05 | 0.03 | 0.31 |
| | Sin cobertura (raíces) | 0.36 | 1.08 | 0.26 | 0.42 | 0.53 |
| Calabacita | Con cobertura vegetal | 0.64 | 0.64 | 0.20 | 0.11 | 0.40 |
| | Sin cobertura (raíces) | 0.91 | 0.89 | 0.19 | 0.62 | 0.65 |
| Avena | Con cobertura vegetal | 0.15 | 0.05 | 0.01 | 0.06 | 0.07 |
| | Sin cobertura (raíces) | 0.69 | 0.41 | 0.55 | 0.50 | 0.54 |

La comparación de la pérdida de suelo en ambos tipos de subparcelas muestra resultados aparentemente contradictorios. Puede verse que a los 15 días de desarrollo el maíz y el frijol presentan mayor pérdida de suelo en las subparcelas con cobertura vegetal que en las subparcelas sin cobertura (raíces); sin embargo, estos resultados son coherentes con los encontrados para el escurrimiento superficial en este mismo tipo de subparcelas y las razones se explicaron en el capítulo correspondiente. A los 30 días de desarrollo todos los tratamientos se comportaron de la forma esperada, es decir hubo mayor pérdida de suelo en las subparcelas sin cobertura (raíces) y menor pérdida en las subparcelas con cobertura vegetal. A los 50 días de desarrollo los tratamientos con cobertura vegetal y sin cobertura (raíces)

de calabacita mostraron un comportamiento atípico pues su pérdida de suelo fue similar mientras que hubo un mayor escurrimiento superficial en la subparcela sin cobertura (raíces). La razón se desconoce aunque se atribuyó a fallas en la colecta de la muestra durante la lluvia simulada.

A los 65 días la pérdida de suelo fue más alta en la subparcela con cobertura vegetal de maíz que en la subparcela sin cobertura (raíces) del mismo cultivo. Esto se esperaba a partir de que se presentó mayor escurrimiento superficial en la subparcela con cobertura vegetal. Lo contrario ocurrió en los demás cultivos donde hubo menor pérdida de suelo en las subparcelas con cobertura vegetal (Figura 44).

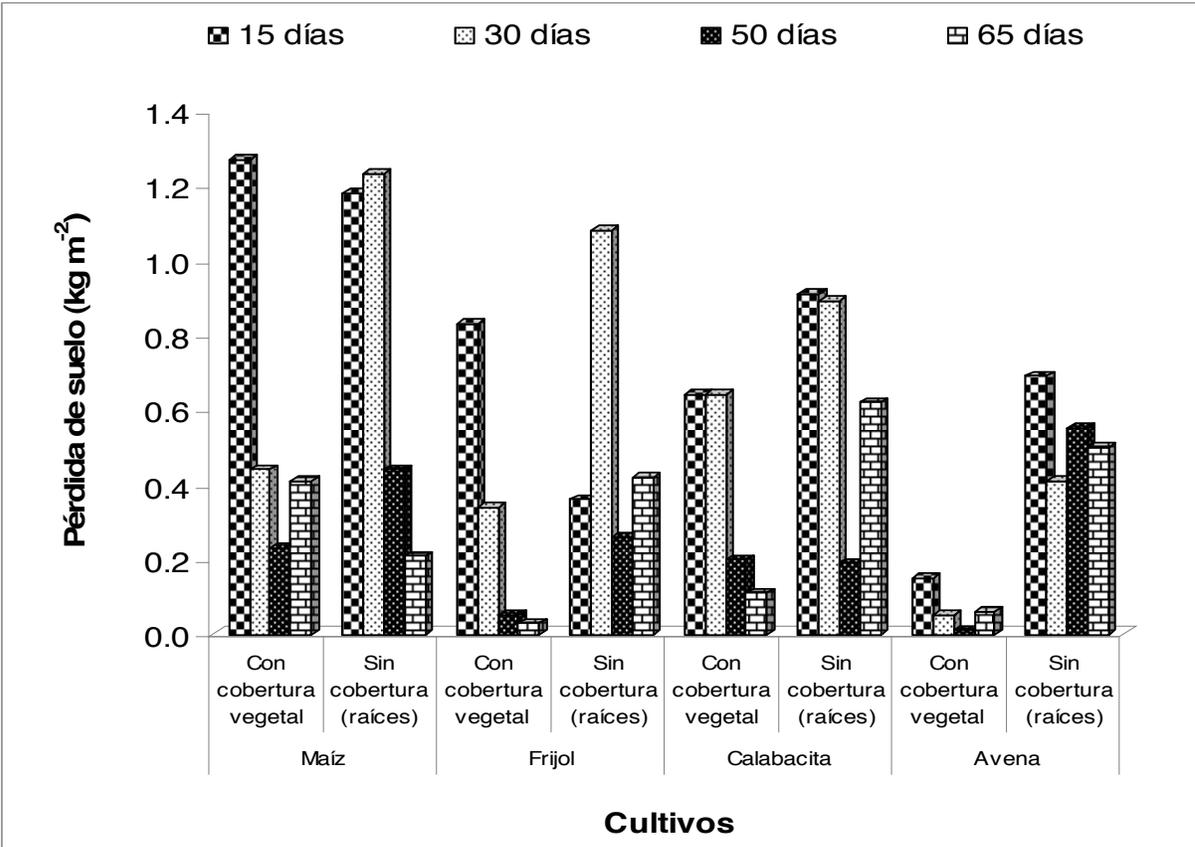


Figura 44. Pérdida de suelo obtenida en subparcelas con cobertura vegetal y sin cobertura (raíces).

Para tratar de separar el efecto de la cobertura vegetal y el sistema radical sobre la pérdida de suelo, se compararon las pérdidas de suelo obtenidas en las

subparcelas con cobertura vegetal y sin cobertura (raíces) y las diferencias promedio se muestran en la Figura 45.

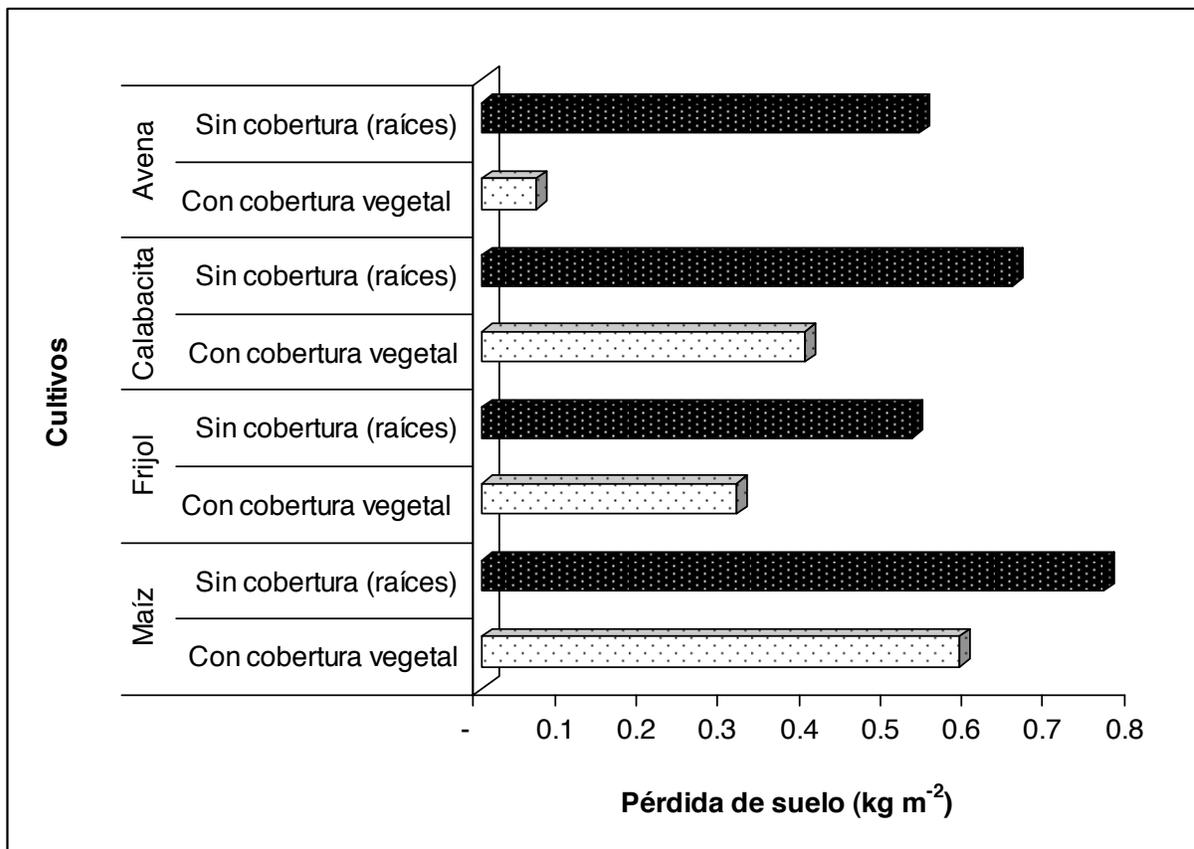


Figura 45. Pérdida de suelo promedio en subparcelas con cobertura vegetal y sin cobertura (raíces) para los cultivos bajo estudio.

La influencia de la cobertura vegetal sobre la reducción de la pérdida de suelo promedio es notoria para todos los cultivos, en comparación con las subparcelas sin cobertura (raíces), ya que estas no tienen la misma capacidad para proteger al suelo de los procesos de remoción y transporte por los agentes erosivos. Destaca que en el cultivo de avena existe una mayor diferencia entre la pérdida de suelo entre las subparcelas con cobertura vegetal y sin cobertura (raíces) debido a que la cobertura vegetal más las raíces de este cultivo brindan más protección al suelo por la cantidad de raíces que conforman su sistema radical en contraste con los cultivos de escarda.

5.8. Cálculo del factor C

Resulta importante analizar que en el proceso erosivo, los cultivos juegan un papel importante en la protección del suelo contra la remoción y transporte de las partículas del suelo por la lluvia y el escurrimiento superficial. Nótese que en este experimento se aplicaron tan solo 320 mm de agua en cuatro eventos de 80 mm h⁻¹ de intensidad. Si asumimos que esta precipitación se presentó en todo el año, con la relación de las pérdidas de suelo con cobertura vegetal y sin cobertura (raíces) se puede obtener el factor de protección de vegetación en contra de la erosión como fue propuesto por Wischmeier y Smith (1978), para cada uno de los cultivos (Cuadro 13)

Cuadro 13. Cálculo del factor C.

| Cultivo | <u>Pérdida de suelo promedio (kg m⁻²)</u> | | Factor C |
|-------------------|---|------------------------|----------|
| | Con cobertura vegetal | Sin cobertura (raíces) | |
| Maíz | 0.59 | 0.77 | 0.77 |
| Frijol | 0.31 | 0.53 | 0.59 |
| Calabacita | 0.40 | 0.65 | 0.61 |
| Avena | 0.07 | 0.54 | 0.13 |

De acuerdo a los resultados de este estudio, la información del factor C indica que un cultivo tupido como la avena tiene una eficiencia del 87% para reducir la erosión del suelo por el efecto de la cobertura vegetal y en menor proporción por las raíces del suelo. El frijol y la calabacita tienen una eficiencia del 40% para reducir la erosión, lo que concuerda con algunos autores que han estimado estos valores (30 a 60% de eficiencia) y que este rango depende de la productividad del cultivo. El cultivo de maíz solo reporta un 23% de eficiencia para reducir la erosión lo cual es comparable con el maíz de baja productividad que reportan otros autores como Figueroa *et al.* (1991).

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De acuerdo con los resultados y los objetivos de la presente investigación se presentan las siguientes conclusiones y recomendaciones.

6.1. Conclusiones

1. De acuerdo con este estudio, existen diferencias en la pérdida de suelo a causa del escurrimiento superficial en subparcelas con cobertura vegetal en los cultivos de maíz, frijol, calabacita y avena, con lo cual se rechaza la hipótesis planteada de que con dichos cultivos la pérdida de suelo causada por el escurrimiento superficial se comporta de forma similar.
2. Se comprobó la hipótesis de que las subparcelas sin cobertura (raíces) de maíz, frijol, calabacita y avena, son menos eficientes en reducir la pérdida de suelo con relación a las subparcelas con cobertura vegetal de estos cultivos.
3. En todas las subparcelas con cobertura vegetal se encontró una relación exponencial negativa entre la cobertura vegetal y la pérdida de suelo, por lo tanto se estableció que a mayor cobertura vegetal menor pérdida de suelo.
4. La mayor pérdida de suelo promedio ocurrió en las subparcelas con cobertura vegetal y sin cobertura (raíces) de maíz (0.59 kg m^{-2} y 0.77 kg m^{-2} , respectivamente) en tanto que las menores pérdidas de suelo se encontraron en las subparcelas con cobertura vegetal de avena (0.07 kg m^{-2}) y sin cobertura (raíces) de frijol (0.53 kg m^{-2}).
5. Todos los cultivos mostraron una clara reducción en el escurrimiento superficial en la medida en que aumentó su cobertura vegetal. En cambio, el desarrollo de las raíces del maíz mostró un ligero efecto en reducir el escurrimiento superficial, no así los demás cultivos cuyo desarrollo de raíces no mostró efecto en reducir el escurrimiento superficial.

6. Tomando en cuenta al análisis del factor C el cultivo más eficiente para reducir la pérdida de suelo fue la avena, seguido del frijol, la calabacita y por último el maíz.

6.2. Recomendaciones

1. Se propone continuar con la evaluación de las mismas coberturas vegetales y sus sistemas radicales en el mismo sitio durante varios años, variando la intensidad de lluvia o bajo condiciones de lluvia natural, a modo de obtener datos que permitan obtener modelos más ajustados a la realidad.
2. A partir de que con este estudio se estableció la tendencia de la pérdida de suelo y el escurrimiento superficial en subparcelas con cobertura y en subparcelas sin cobertura (raíces) de los cultivos bajo estudio, futuras investigaciones deberán incluir un diseño experimental.
3. Puesto que la humedad del suelo afecta la infiltración de agua en el suelo y por tanto el escurrimiento superficial, es preciso que futuras investigaciones hagan mediciones de la humedad antecedente y la relacionen con el escurrimiento superficial y pérdida de suelo que se dan en las parcelas de cultivo.
4. Como en esta zona, se tienen terrenos agrícolas en condiciones de 10% de pendiente, se deberán promover técnicas productivo-conservacionistas entre los agricultores que implantan cultivos de escarda para reducir el impacto de estos cultivos sobre la pérdida de suelo.
5. En futuros trabajos se deberá tomar en cuenta la influencia que tienen el sistema radical en la compactación del suelo y en la estabilidad de agregados.

7. LITERATURA CITADA

- Alcalá J., M., J. L. Oropeza M. y J. L. Tovar S. 1998. Producción de sedimentos en diferentes usos del suelo, en la cuenca del Río los Sauces, Michoacán. *Agrociencia* 32: 225-231.
- Amezqueta, E. 1999. Soil Aggregate Stability: a review. *Journal of Sustainable Agriculture* 14 (2-3): 83-151.
- Anderson, E. L. 1987. Corn Root Growth and Distribution as Influenced by Tillage and Nitrogen Fertilization. *Agronomy Journal* 79: 544-549.
- Arsenault, J. L., S. Poulcur, C. Messier and R. Guay. 1995. WinRHI-ZO™, a Root-Measuring System with a Unique Overlap Correction Method. *HortoScience* 30: 906 abstract.
- Ball-Coelho, B. R., R. C. Roy and C. J. Swanton. 1998. Tillage Alters Corn Root Distribution in Coarse-Textured Soil. *Soil and Tillage Research* 45: 237-249.
- Behrens, T. and W. Diepenbrock. 2006. Using Digital Image Analysis to Describe Canopies of Winter Oilseed Rape (*Brassica napus* L.) During Vegetative Developmental Stages. *Journal of Agronomy and Crop Science* 192: 295-302.
- Belmonte S., F., A. Romero D. y F. López B. 1998. Efectos sobre la cubierta vegetal, la escorrentía y la erosión del suelo, de la alternancia cultivo-abandono en parcelas experimentales. [En línea]. Disponible en <http://www.cervantesvirtual.com> (verificado el 19 de septiembre de 2006).
- Betancourt Y., P., J. L. Oropeza M., B. Figueroa S., V. Ordaz C., C. Ortiz S. y A. Hernández G. 2000. Pérdidas de suelo y potencial hidrológico en parcelas con coberturas vegetativas de especies forrajeras. *Terra* 18: 263-275.
- Blackburn, W. H., F. B. Pierson, C. L. Hanson, T. L. Thurow and A. L. Hanson. 1992. The Spatial and Temporal Influence of Vegetation on Surface Soil Factors in Semiarid Rangelands. *Transactions of the ASAE* 35: 479-486.
- Brenneman, L. G. and J. M. Laflen. 1982. Modeling Sediment Deposition Behind Corn Residue. *Transactions of the ASAE* 25: 1245-1250.
- Böhm, W. 1979. *Methods of Studying Roots Systems*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. New York. 188 p.
- Bui, E. N. and J. E. Box Jr. 1993. Growing Corn Root Effects on Interrill Soil Erosion. *Soil Science Society of America Journal* 57: 1066-70.

- Brown, D. 1954. Methods of Surveying and Measuring Vegetation. Commonw. Bur. Pastures Field Crops. Hurley Berks, Bull. 42.
- Cachón A., H. E., H. Nery G. y H. E. Cuanalo C. 1976. Los suelos del área de influencia de Chapingo. Rama de suelos. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México. 79 p.
- Campbell, N. A. and G. W. Arnold. 1973. The Visual Assessment of Pasture Yield. Aust. J. Exp. Agric. Husb. 13: 263-267.
- Cannon, W. A. 1949. A Tentative Classification of Root Systems. Ecology 30: 452-58.
- Carroll, C., M. Halpin, P. Burger, K. Bell, M. M. Sallaway and D. F. Yule. 1997. The Effect of Crop Type, Crop Rotation, and Tillage Practice on Runoff and Soil Loss on a Vertisol in Central Queensland. Australian Journal of Soil Research 35: 925-939.
- Carroll, C., L. Merton and P. Burger. 2000. Impact of Vegetative and Slope on Runoff, Erosion, and Water Quality for Field Plots on a Range of Soil and Spoil Materials on Central Queensland Coal Mines. Australian Journal of Soil Research 38: 313-327.
- Chinea, E., A. Rodríguez R. y J. L. Mora. 2004. Control de la erosión del suelo con leguminosas arbustivas forrajeras endémicas de Canarias. Rev. Fac. Agron. (LUZ) 21:363-373.
- Clarkson, D. T. and J. B. Hanson. 1980. The Mineral Nutrition of Higher Plants. Annu. Rev. Plant. Physiol. 31: 239-298.
- Corel Corporation, 2005. *Corel Photo Paint X3*. Version 13.00.576.
- Costa, C., L. M. Dwyer, R. I. Hamilton, C. Hamel, L. Nantais and D. L. Smith. 2000. A Sampling Method for Measurement of Large Root Systems with Scanner-Based Image Analysis. Agronomy Journal 92: 621-627.
- Cunningham, M., M. B. Adams, R. J. Luxmoore, W. M. Post and D. L. De Angelis. 1989. Quick Estimates of Root Length, Using a Video Image Analyzer. Can. J. For. Res. 19: 335-340.
- De Baets, S., J. Poesen, G. Gyssels and A. Knapen. 2006. Effects of Grass Roots on the Erodibility of Topsoils During Concentrated Flow. Geomorphology 76: 54-67.
- Dowdy, R. H., E. A. Nater and M. S. Dolan. 1995. Quantification of the Length and Diameter of Roots Segments with Public Domain Software. Communications in Soil Science and Plant Analysis 26: 459-468.

- Durán Z., V. H., J. R. Francia M. and A. Martínez R. 2004a. Impact of Vegetative Cover on Runoff and Soil Erosion at Hillslope Scale in Lanjaron, Spain. *The Environmentalist* 24:39-48.
- Durán Z., V. H., R. A. Martínez and R. J. Aguilar. 2004b. Nutrient Losses by Runoff and Sediment from the Taluses of Orchard Terraces. *Water, air and Soil Pollut.* 153: 355-373.
- Durieux, R. P., E. J. Kamprath, W. A. Jackson and R. H. MOLL. 1994. Root Distribution of Corn: the Effect of Nitrogen Fertilization. *Agronomy Journal* 86: 958-962.
- Eastman, J. R. 2003. *IDRISI: Guide to GIS and Image Processing. Version 14.0 (Kilimanjaro)*. Clark University.
- Eldridge, D. J. and T. B. Koen. 1993. Run-off and Sediment Yield From a Semi-Arid Woodland in Eastern Australia. II. Variation in Some Soil Hydrological Properties Along a Gradient in Soil Surface Condition. *Rangeland Journal* 15: 234-246.
- Eldridge, D. J. and R. S. B Greene. 1994. Assessment of Sediment Yield by Splash Erosion on a Semi-arid Soil with Varying Cryptogam Cover. *Journal of Arid Environments* 26: 221-232.
- Elwell, H. A. and M. A. Stocking. 1976. Vegetal Cover to Estimate Soil Erosion Hazard in Rhodesia. *Geoderma* 15: 61-70.
- Elwell, H. A. and S. Gardener. 1976. Comparison of two Techniques for Measuring Per Cent Crop Canopy Cover of Row Crops in Erosion Research Programmers. *Research Bulletin No. 19. Department of Conservation and Extension. Rhodesia.* 11p
- Esau, K. 1982. *Anatomía de las Plantas con Semilla. 1a Edición en español*. Editorial Hemisferio Sur S.A. Buenos Aires, Argentina. 512 p.
- Faminow, M. D. 1998. *Cattle, Deforestation and Development in the Amazon: An Economic, Agronomic and Environmental Perspective*. CAB International Wallingford. U.K. 253 pp.
- FAO. 1997. *Medición sobre el terreno de la erosión del suelo y de la escorrentía*. Boletín de Suelos de la FAO – 68. Roma. Italia.
- FAO. 2000. *Manual de prácticas integradas de manejo y conservación de suelos*. Boletín de tierras y aguas de la FAO. Roma. Italia. 220 p.
- Ferrari, D. M., O. R. Pozzolo y H. Ferrari J. 2007. *Desarrollo de un Software para Estimación de Cobertura Vegetal*. Estación Experimental Agropecuaria INTA

Concepción del Uruguay. Entre Ríos, Argentina. [En línea]. Disponible en <http://www.cosechaypostcosecha.org> (verificado el 6 de febrero de 2007).

Fiener, P. and K. Auerswald. 2005. Measurement and Modeling of Concentrated Runoff in Grassed Waterways. *Journal of Hydrology* 301: 198-215.

Figueroa S., B. 1975. La pérdida de suelo y nutrimentos y su relación con el uso del suelo en la cuenca del Río Texcoco. Tesis de M. C. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México .149 p.

Figueroa S., B., A. Amante O., H. G. Cortes T., J. Pimentel L., E. S. Osuna C., J. M. Rodríguez O. y F. J. Morales F. 1991. Manual de predicción de pérdidas de suelo por erosión. Colegio de Postgraduados, Centro regional para estudios de zonas áridas y semiáridas. 150 p.

Figueroa S., B. y F. J. Morales F. 1992. Manual de producción de cultivos con labranza de conservación. Colegio de Postgraduados. Texcoco, México. 273 p.

Fuller, H. J., Z. B. Carothers, W. W. Payne and M. K. Balbach. 1974. *Botánica*. Editorial Interamericana. México. 512 p.

Gelder, B. K. 2000. Root Length Density and Diameter of Three Grass Species. Iowa State University. [En línea]. Disponible en <http://www.google.com.mx/search?q=root+length+density+in+corn&hl=es&start=20&sa=N> (verificado el 3 de enero de 2007).

Ghidey, F. and E. E. Alberts. 1997. Plant Root Effects on Soil Erodibility, Splash Detachment, Soil Strength, and Aggregate Stability. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 40: 129-35.

Glinski, J. and J. Lipiec. 1990. *Soil Physical Conditions and Plants Roots*. Boca Raton, FL. CRC Press.

Gómez, J. A., P. Romero, J. V. Giráldez and E. Fereres. 2004. Experimental Assessment of Runoff and Soil Erosion in an Olive Grove on a Vertic Soil in Southern Spain as Affected by Soil Management. *Soil Use and Management* 20: 426-431.

González S., E. J. 2006. Erosión: La importancia de la conservación del suelo. Asociación Española Agricultura de Conservación/ Suelos Vivos (AEAC/SV) [En línea]. Disponible en <http://www.aeac-sv.org> (verificado el 30 noviembre de 2006).

Greene, R. S. B., P. I. A. Kinnell and J. T. Word. 1994. Role of Plant Cover and Stock Trampling on Runoff and Soil Erosion from Semi-arid Wooded Rangelands. *Australian Journal of Soil Research* 32: 953-973.

- Gutierrez, J. and I. I. Hernandez. 1996. Runoff and Interrill Erosion as Effected by Grass Cover in a Semi-arid Rangeland of Northern Mexico. *Journal of Arid Environments* 34: 287-295.
- Guerrero-Campo, J. and A. H. Fitter. 2001. Relationships Between Root Characteristics and Seed Size in two Contrasting Environments. *Acta Ecologica* 22: 77-85.
- Gross, C. M., J. S. Angle, R. L. Hill and M.S. Welterlen. 1991. Runoff and Sediment from Tall Fescue under Simulated Rainfall. *J. Environ. Qual.* 20: 604-607.
- Gyssels, G., J. Poesen, J. Nachtergaele and G. Govers. 2002. The Impact of Sowing Density of Small Grains on Rill and Ephemeral Gully Erosion in Concentrated Flow Zones. *Soil and Tillage Research* 64: 189-201.
- Gyssels, G. and J. Poesen. 2003. The Importance of Plant Root Characteristics in Controlling Concentrated Flow Erosion Rates. *Earth Surface Processes and Landforms* 28: 371-84.
- Gyssels, G., J. Poesen, E. Bochet and Y. Li. 2005. Impact of Plant Roots on the Resistance of Soils to Erosion by Water: a review. *Progress in Physical Geography* 29: 189-217.
- Gyssels, G., J. Poesen, G. Liu, W. Van Dessel, A. Knapen and S. De Baets. 2006. Effects of Cereal Roots on Detachment Rates of single- and double-drilled Topsoils During Concentrated flow. *European Journal of Soil Science* 57: 381-391.
- Hartwig, N. L. and H. U. Ammon. 2002. Cover Crops and Living Mulches. *Weed Science* 50:688-699.
- Hartwing, R. O. and J. M. Laflen. 1978. A Meter Stick Method for Measuring Crop Residue Cover. *Journal of Soil and Water Conservation* 33: 90-91.
- Henriksen, I., A. Michelsen and A. Achlönvoigt. 2002. Tree Species Selection and Soil Tillage in Alley Cropping Systems with *Phaseolus vulgaris* L. in a Humid Premontane Climate: Biomass Production, Nutrient Cycling and Crop Responses. *Plant and Soil* 240: 145-159.
- Hudson, N.W. 1980. Erosion Prediction with Insufficient Data. In M. D. Boodt and D. Gabriels (Eds.), *Assessment of Erosion*. Wiley, New York.
- Huss, D. L., A. E. Bernardón, D. L. Anderson and J. M. Brun. 1986. Principios de manejo de praderas naturales. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. INTA y FAO (RLAC). 355p.

- Hyams, D. 1995. Curve Expert 1.3: A Comprehensive Curve Fitting System for Windows. Copyright (c).
- Ibarra, M., G. Mancilla y M. Peralta. 1992. Evaluación de la erosión hídrica bajo tres tipos de cubierta arbórea en la cordillera de Nahuelbuta. Santiago, Chile. Departamento de Silvicultura, Universidad de Chile. 14 p.
- Kaspar, T. C. and R. P. Ewing. 1997. ROOTEDGE: Software for Measuring Root Length from Desktop Scanner Images. *Agronomy Journal* 89:932-940.
- Kimura, K., S. Kikuchi and S. Yamasaki. 1999. Accurate Root Length Measurement by Image Analysis. *Plant and Soil* 216: 117-127.
- Kimura, K. and S. Yamasaki. 2001. Root Length and Diameter Measurement Using NIH Image: Application of the Line-intercepted Principle for Diameter Estimation. *Plant and Soil* 234: 37-46.
- Kramer, P. J. and J. S. Boyer. 1995. *Water Relations of Plants and Soils*. Academic Press. USA. 495 p.
- Kosmas, C., N. Danalatos, L. H. Cammeraat, M. Chabart, J. Diamantopoulos, L. Farand, L. Gutierrez, A. Jacob, H. Marques, N. Tomasi, D. Usai and A. Vaca. 1997. The Effect of Land Use on Runoff and Soil Erosion Rates under Mediterranean Conditions. *Catena* 29: 45-59.
- Lal, R. 2000. *Integrated Watershed Management in the Global Ecosystem*. Edited by Rattan Lal. Soil and Water Conservation Society. New York: CRC Press. 395 p.
- Leventhal, A. R. and G. R. Mostyn. 1987. Slope Stabilization Techniques and Their Application, Soil Slope Instability and Stabilization. Edited By Walker B. and Fell R., A.A. Balkema, Rotterdam, pp: 183-230
- Li, Y., Zhu X.-M. and J.-Y. Tian. 1991. Effectiveness of Plant Roots to Increase the Anti-scourability of Soil on the Loess Plateau. *Chinese Science Bulletin* 36: 2077-2082.
- Li, Y., Xu X.-Q., Zhu X.-M. and J.-Y. Tian. 1992. Effectiveness of Plant roots on Increasing the Soil Permeability on the Loess Plateau. *Chinese Science Bulletin* 37: 1735-38.
- Linsley, R. K., M. A. Kholer and J. L. H. Paulhus. 1993. *Hidrología para ingenieros*. Segunda Edición. McGraw-Hill. México D.F. 386 p.
- Lipiec, J., I. Hakansson, S. Tarkiewicz and J. Kossowski. 1991. Soil Physical Properties and Growth of Spring Barley as Related to the Degree of Compactness of two Soils. *Soil and Tillage Research* 19: 307-317.

- Loch, R. J. 2000. Effects of Vegetation Cover on Runoff and Erosion under Simulated Rain and Overland Flow on a Rehabilitated Site on the Meandu Mine, Tarong, Queensland. *Australian Journal of Soil Research* 38: 299-312.
- López, B. F., D. A. Romero, J. F. Martínez and F. J. Martínez. 1998. Vegetation and Soil Erosion under Semi-arid Mediterranean Climate: A Case Study from Murcia (Spain). *Geomorphology* 24: 51-58.
- MacGregor, J. P. and K. J. McManus. 1992. Management of Lands Subject to Mass Movements, Proceedings of the Sixth International Symposium on Landslides. Christchurch New Zealand. Vol 2, pp: 1437-1444.
- Macias 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. Chapingo México. 133 p.
- Majdi H., A., A. J. M. Smucker and H. Persson. 1992. A Comparison Between Minirrizotrófon and Monolito Sampling Methods for Measuring Growth of Maize (*Zea mays* L.). *Plant and Soil* 147: 127-134.
- Manske, G. G. B., J. I. Ortiz-Monasterio and P. L. G Vlek. 2001. Techniques for Measuring Genetic Diversity in Roots. In: Reynolds, M.P., Ortiz-Monasterio, J.I. and McNab, A. (Eds.). Application of physiology in wheat breeding. CIMMYT. México, D.F. pp. 208-218.
- Mamo, M. and G. D. Bubenzer. 2001a. Detachment Rate, Soil Erodibility, and Soil Strength as Influenced by Living Plant Roots. Part I: Laboratory Study. *Transactions of the ASAE* 44: 1167-74.
- Mamo, M. and G. D. Bubenzer. 2001b. Detachment Rate, Soil Erodibility, and soil Strength as Influenced by Living Plant Roots. Part II: Field Study. *Transactions of the ASAE* 44: 1175-81.
- Martinez-Fernandez, J., F. Lopez B., J. Martinez F. and A. Romero D. 1995. Land Use and Soil-vegetation Relationships in a Mediterranean Ecosystem. El Ardal, Murcia España. *Catena* 25: 153-167.
- Martínez M., M. R. 1999. Programas nacionales de conservación de suelos: Análisis retrospectivo. pp. 407-426. In: C. Siebe, H. C. Rodarte, G. Toledo, J. Etchevers y K. Oleschko (ed.). Conservación y restauración de suelos. UNAM, México, D.F.
- Marsh, Ba 'B. 1971. Measurement of Length in Random Arrangements of Lines. *J. Appl. Ecol.* 8: 265-267.

- Mclvor, J. G., J. Williams and C. J. Gardener. 1995. Pasture Management Influences Runoff and Soil Movement in the Semiarid Tropics. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 35: 55-65.
- Morgan, R. P. C. 1997. Erosión y conservación del suelo. Silsoe Collage Cranfield University. Ediciones Mundi Prensa. 343 p.
- Morley, F. H. W., D. Bennett and K. W. Clark. 1964. The Estimation of Pasture Yield in Large Grazing Experiments. *Aust. CSIRO. Div. plant. Ind. Field. Stn. Rec.* 3: 43-47.
- Murphy, S. L. and A. J. M. Smucker. 1995. Evaluation of Video Image Analysis and Line-intercept Methods for Measuring Root Systems of Alfalfa and Ryegrass. *Agron. J.* 87: 865-868.
- Návar, J. y T. J. Synnott. 2000. Escorrentía superficial, erosión edáfica y uso del suelo en el noreste de México. *Terra* 18: 247-252.
- Navarro G., H., M. A. Pérez O. y F. Castillo G. 2005. Evaluación de cinco especies vegetales como cultivos de cobertura en Valles Altos de México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 30: 151-157.
- Newman, E. I. 1966. A Method of Estimating the Total Length of Root in a Simple. *J. Appl. Ecol.* 3: 139-145.
- Núñez U., M. C. y E. C. de Bisbal. 1999. Efecto de la compactación del suelo sobre algunos parámetros morfológicos del desarrollo radical del maíz. *Agronomía Tropical* 49:93-106.
- Obando, F. H. 2000. La relación erosión-productividad en los llanos orientales de Colombia: avances en la investigación. Universidad de Caldas Manizales, Colombia. [En línea]. Disponible en http://www.ciat.cgiar.org/tsbf_institute/pdf/conservacion_suelos_parte_a.pdf. (verificado el 2 de Octubre de 2006).
- Ontiveros C., Analí. 2003. Dinámica de crecimiento y anatomía de la raíz de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) sometida a diferente velocidad de secado del suelo. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Chapingo México.
- Ottman, M. J. and H. Timm. 1984. Measurement of Viable Plant Roots with the Image Analyzing Computer. *Agron. J.* 76: 1018-1020.
- Osuna C., E. S. y F. Esquivel V. 1996. Cobertura vegetal y erosión del suelo en Aguascalientes. *Agricultura Técnica en México* 22:127-144.
- Pavlychenko, T. K. 1937. Quantitative Study of the Entire Root Systems of Weed and Crop plants under Field conditions. *Ecology* 18: 62-79.

- Peter, I. and J. Lehmann. 2000. Pruning Effects on Root Distribution and Nutrient Dynamics in an Acacia Hedgerow Planting in Northern Kenya. *Agroforestry Systems* 50: 59-73.
- Pimentel D., C. Harvey, P. Resosudarmo, K. Sinclair, D. Kurz, M. McNair, S. Crist, L. Shpritz, I. Fittol, R. Saffouri and R. Blair. 1995. Environmental and Economic Cost of Soil Erosion and Conservation Benefits. *Science* 267: 1117-1123.
- Pire C., R. 1986. Densidad longitudinal de raíces y extracción de humedad en un viñedo de El Tocuyo, Venezuela. *Agronomía Tropical* 35: 5-20.
- Qin, R., P. Stamp and W. Richner. 2004. Root Development. Impact of Tillage on Root Systems of Winter Wheat. *Agronomy Journal* 96: 1523-1530.
- Quinton, J. N., G. M. Edwards and R. P. C. Morgan. 1997. The Influence of Vegetation Species and Plant Properties on Runoff and Soil Erosion: Results from a Rainfall Simulation Study in South East Spain. *Soil Use and Management* 13: 143-148.
- Ramírez C., M. E. y J. L. Oropeza M. 2001. Eficiencia de dos prácticas productivo conservacionistas para controlar erosión de laderas en el trópico. *Agrociencia* 35: 489-495.
- Richards, B. K., M. K. Walter and R. E. Muck. 1984. Variation in Line Transect Measurements of Crop Residue Cover. *Journal of Soil and Water Conservation* 39: 60-61.
- Richards, D., F. H. Goubran, W. N. Garwoli and M. W. Daly. 1979. A Machine for Determining Root Length. *Plant and Soil* 52: 69-76.
- Ríos B., J. D. y M. R. Martínez M. 1990. Efecto de la cobertura vegetal en el proceso erosivo. *Agrociencia* 1: 61-73.
- Rowse, H. R. and D. A. Phillips. 1974. An Instrument for Estimating the Total Length of Root in a Sample. *J. Appl. Ecol.* 11: 309-314.
- Ruiz O., M., D. Nieto R. y I. Larios R. 1983. *Tratado elemental de Botánica*. Décima quinta edición. Editorial E.C.L.A.L.S.A., Salvador Alvarado 105, México D.F. 730 p.
- Russell, R. S. 1977. *Plant Roots System: Their Function and Interaction with Soil*. McGraw-Hill . London.
- Sallaway, M. M., D. Lawson, and D. F. Yule. 1988. Ground Cover during Fallow from Wheat, Sorghum and Sunflower Stubble under Three Tillage Practices in Central Queensland. *Soil and Tillage Research* 12: 347-364.

- Sánchez C., I., J. Stone y R. Jasso I. 1999. Uso de lluvia artificial para parametrizar modelos de procesos hidrológicos. SAGAR-INIFAP-CENID RASPA. Primera edición. 114 p.
- Sánchez, L. A., M. Ataroff and R. López. 2002. Soil Erosion under Different Vegetation Covers in the Venezuelan Andes. *The Environmentalist* 22: 161-172.
- Schenk, H. J. and R. B. Jackson. 2002. The Global Biogeography of Roots. *Ecological Monographs* 72: 311-28.
- Self-Davis, M. L., P. A. Moore Jr., T. C. Daniel, D. J. Nichols, T. J. Sauer, C. P. West, G. E. Aiken and D. R. Edwards. 2003. Forage Species and Canopy Cover Effects on Runoff from Small Plots. *Journal of Soil and Water Conservation* 58: 349-359.
- Serna P., A. y F. G. Echavarría C. 2002. Caracterización hidrológica de un agostadero comunal excluido al pastoreo en Zacatecas, México. I. Pérdidas de suelo. *Técnica Pecuaria México* 40: 37-53.
- SIAP. Servicio de información y estadística agroalimentaria y pesquera. 2007. <http://www.siap.gob.mx/> (verificado el 24 agosto 2006)
- Singh, D. K. and P. W. G. Sale. 2000. Root Development. Growth and Potential Conductivity of White Clover Roots in Dry Soil with Increasing Phosphorus Supply and Defoliation Frequency. *Agronomy Journal* 92: 868-874.
- Smit, A. L., A. G. Bengough, C. Engels, M. van Noordwijk, S. Pellerin and S. C. van de Geijn. 2000. *Roots Methods, a Handbook*. Springer-Verlag, Heidelberg.
- Smucker, A. J. M., S. L. McBurney and A. K. Srivastava. 1982. Quantitative Separation of Roots from Compacted Soil Profiles by the Hidroneumatic Elutriation System. *Agronomy Journal* 74: 500-503.
- Smucker, A. J. M. 1992. Contemporary Analytical Methods for Quantifying Plant Root Dynamics. pp. 721-726. In: Kutschera, L., Hubl, E., Lichtenecker, E., Persson H. and Sobotik (eds.) *Root Ecology and Its Practical Applications*. Verein für Wurzelorschung Viena.
- Snelder, D. J. and R. B. Bryan. 1995. The use of Rainfall Simulation Tests to Assess the Influence of Vegetation Density on Soil Loss on Degraded Rangelands in the Baringo District, Kenya. *Catena* 25: 105-116.
- Solano T., J. A., M. Martínez M., J. L. Oropeza M. y M. Anaya G. 1990. Efecto de la relación precipitación-escorrentía en el proceso erosivo en diferentes usos de suelo en la cuenca del Río Texcoco. *Agrociencia* 1: 25-44.

- Tardieu, F. 1988. Analysis of the Spatial Variability in Maize Root Density. *Plant and Soil* 109: 257-262.
- Taylor, H. M. 1986. Methods of Studying Root Systems in the Field. *HortScience* 21: 952-956.
- Tengbeh, G. T. 1993. The Effect of Grass Roots on Shear Strength Variations with Moisture Content. *Soil Technology* 6: 287-295.
- Tennant, D. 1975. A Test of a Modified Line Intersect Method of Estimating Root Length. *J. Ecol.* 63: 995-1101.
- Teo, Y. H., C. A. Beyrouthy, R. J. Norman and E. E. Gbur. 1995. Nutrient Uptake Relationship to Root Characteristics of Rice. *Plant and Soil* 171: 297-302.
- Tisdall, J. M. and J. M. Oades. 1982. Organic Matter and Water-stable Aggregates in Soils. *Journal of Soil Science* 33: 141-63.
- Troeh, F. R., J. A. Hobbs and R. L. Donahue. 1980. *Soil and Water Conservation for Productivity and Environmental Protection*. Editorial Leslie Nadell. Prentice-Hall, Inc. New Jersey. 718 p.
- Turkelboom, F., J. Poesen, I. Ohler, K. van Keer, S. Ongprasert and K. Vlassak. 1997. Assessment of Tillage Erosion Rates on Steep Slopes in Northern Thailand. *Catena* 29: 29-44.
- Waisel, Y., A. Eshel and U. Kafkafi. 1996. *Plant Roots, the Hidden Half*. Second Edition. New York. Marcel Decker.
- Waldron, L. J. 1977. The Shear Resistance of Root-permeated Homogeneous and Stratified Soil. *Soil Science Society of America Journal* 41: 843-49.
- Wilcox, B. P. and M. K. Word. 1989. Factors Influencing Interrill Erosion from Semiarid Slopes in New Mexico. *Journal of Range Management* 42: 66-70.
- 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.
- Zazueta Z., G. 1984. Influencia de los sistemas de labranza y obras de conservación en la productividad de los suelos. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.
- Zhou, Z. C. and Z. P. Shangguan. 2005. Soil Anti-scourability Enhanced by Plant Roots. *Journal of Integrative Plant Biology* 47: 676–682.

Ziemer, R. R. 1981. Roots and Stability of Forested Slopes. International Association of Hydrological Sciences Publication 132: 343-361.

Zoon, F. C., and P. H. Van Tienderen. 1990. A Rapid Quantitative Measurement of Root Length and Root Branching by Microcomputer Image Analysis. Plant and Soil 126: 301-308.

8. ANEXO

ANEXO A. Densidad longitudinal de raíces (DLR), por cultivo, en capas de 10 cm hasta una profundidad de 35 cm.

| <u>Maíz</u> | | | | |
|--|------------|------------|------------|-------------|
| <u>DLR en km m^{-3}, según días de desarrollo</u> | | | | |
| Capas de la cubeta | 15 | 30 | 50 | 65 |
| 0-10 cm | 2.4 | 4.6 | 5.1 | 37.5 |
| 10-20 cm | 4.4 | 1.3 | 1.5 | 25.6 |
| 20-30 cm | 0.0 | 1.2 | 1.2 | 13.3 |
| 30-35 cm | 0.0 | 2.1 | 2.0 | 19.4 |
| TOTAL | 6.8 | 9.2 | 9.8 | 95.8 |

| <u>Frijol</u> | | | | |
|--|------------|------------|-------------|-------------|
| <u>DLR en km m^{-3}, según días de desarrollo</u> | | | | |
| Capas de la cubeta | 15 | 30 | 50 | 65 |
| 0-10 cm | 0.3 | 1.6 | 4.3 | 8.6 |
| 10-20 cm | 1.5 | 3.0 | 4.3 | 8.3 |
| 20-30 cm | 0.0 | 2.2 | 2.1 | 4.5 |
| 30-35 cm | 0.0 | 1.8 | 2.8 | 8.0 |
| TOTAL | 1.8 | 8.5 | 13.4 | 29.4 |

Calabacita

DLR en km m⁻³, según días de desarrollo

| Capas de la cubeta | 15 | 30 | 50 | 65 |
|---------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 0-10 cm | 0.2 | 0.8 | 4.4 | 6.8 |
| 10-20 cm | 0.0 | 0.1 | 2.0 | 3.2 |
| 20-30 cm | 0.0 | 0.2 | 1.2 | 1.7 |
| 30-35 cm | 0.0 | 0.1 | 1.4 | 2.8 |
| TOTAL | 0.2 | 1.2 | 9.0 | 14.6 |

Avena

DLR en km m⁻³, según días de desarrollo

| Capas de la cubeta | 15 | 30 | 50 | 65 |
|---------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 0-10 cm | 6.6 | 72.7 | 99.2 | 136.2 |
| 10-20 cm | 8.4 | 30.4 | 25.8 | 26.3 |
| 20-30 cm | 0.0 | 20.4 | 15.6 | 14.5 |
| 30-35 cm | 0.0 | 34.2 | 23.3 | 23.9 |
| TOTAL | 15.0 | 157.7 | 163.8 | 201.0 |
