



# Estudios científicos en el estado de Hidalgo y zonas aledañas

Volumen I

**Editores**

Scott Monks  
Griselda Pulido-Flores  
Maritza López-Herrera



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

Luis Gil Borja

*Rector*

Humberto A. Veras Godoy

*Secretario General*

Otilio Arturo Acevedo Sandoval

*Coordinador de la División de Investigación y Posgrado*

Marco Antonio Alfaro Morales

*Coordinador de la División de Extensión de la Cultura*

Octavio Castillo Acosta

*Director del Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería*

Alberto Enrique Rojas Martínez

*Director del Área Académica de Biología*

Horacio Romero

*Director de Ediciones y Publicaciones*

Primera edición: 2009

© Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo  
Abasolo 600, Centro, Pachuca, Hidalgo, México, CP 42000

Correo electrónico: [editor@uaeh.edu.mx](mailto:editor@uaeh.edu.mx)

Prohibida la reproducción parcial o total de esta obra sin el consentimiento escrito de la UAEH.

ISBN 978-607-482-012-6

# ECOLOGÍA DE RAÍCES Y CAMBIO GLOBAL EN ZONAS SEMIÁRIDAS DE MÉXICO

Numa P. Pavón

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Centro de Investigaciones Biológicas, Laboratorio de Ecología de Comunidades. npavon@uaeh.edu.mx

## Resumen

En este trabajo se establecen las relaciones entre el estudio de la ecología de las raíces y las variables derivadas del cambio global. Se presenta la importancia funcional de las raíces y la relación con su talla, así como las diferencias en los sistemas radicales entre diferentes formas de vida de las plantas. En un estudio de caso se muestran algunas experiencias obtenidas en ambientes semiáridos ubicados al interior de la reserva de la biosfera Barranca de Metztitlán, señalando las características que hacen de esta área un sitio propicio para realizar estudios ecológicos a nivel subterráneo. Finalmente, se discuten algunos temas de estudio de la ecología de las raíces que serán importantes para entender los efectos derivados del cambio global.

## El estudio de la dinámica de raíces y su relación con el cambio global

La preocupación mundial sobre el cambio global ha dado como resultado que los procesos ecosistémicos tengan un papel prominente en su mitigación. En México, por ejemplo, los bosques pueden representar un almacén de carbono aproximado de 8 GtC, cercano a las emisiones actuales de CO<sub>2</sub> en el mundo (Macera *et al.*, 1997). Sin embargo, aún se carece de información básica sobre los contenidos de carbono en los almacenes o compartimentos al interior de los diferentes ecosistemas (Hughes *et al.*, 2000). Así, gran parte de las estimaciones se basan en el cálculo tradicional forestal, el cual consiste en considerar sólo la madera utilizable en los troncos de los árboles en pie, pero rara vez toman en cuenta que en el suelo se mantiene más de la mitad del carbono, cuya incorporación ocurre principalmente por dos vías: el mantillo y la biomasa de raíces (Oliva y García-Oliva, 1998).

Hasta hace relativamente poco tiempo se iniciaron los estudios que relacionan los procesos subterráneos con el cambio ambiental global (Caldwell, 2000). Con ello se

permite abordar el objetivo de estimar la capacidad de los ecosistemas para secuestrar carbón, ya que el componente clave está en el sistema subterráneo, constituido por las raíces, el suelo y los microorganismos (Norby y Jackson, 2000). Los cambios en la producción y recambio de raíces en bosques bajo una alta concentración del CO<sub>2</sub> atmosférico, elevadas temperaturas, regímenes de lluvia alterados y deposición de nitrógeno, podrían ser claves para entender la respuesta de las plantas (y los cambios a largo plazo), no sólo en el balance del carbono en el ecosistema sino también de otros nutrientes esenciales como el nitrógeno (Norby y Jackson, 2000). Como derivado de las actividades humanas, en las décadas recientes se ha incrementado la deposición de nitrógeno en el suelo de los diferentes ecosistemas. El estudio de los patrones y procesos de las raíces puede proporcionar conocimientos básicos que contribuyan en la investigación sobre los efectos del cambio global, el cual se refiere principalmente a la estimación de la biomasa subterránea y su papel en el ciclaje de nutrientes, con lo que puede determinarse, por ejemplo, cuánto carbono se almacena en el suelo de un ecosistema particular (Brown, 1999; Harmon, 2001). Por otro lado, es posible evaluar el efecto de la deposición de nitrógeno en el suelo determinado las variaciones en la dinámica de las raíces.

## Relaciones entre la biomasa-producción de raíces con el carbono y la disponibilidad de nitrógeno

El carbono es un elemento fundamental en la estructura de los seres vivos. Se estima que su contenido en la biomasa corresponde a alrededor del 33%. En los diferentes ecosistemas, una gran parte de la biomasa pertenece a las plantas; de ésta, cerca del 50% se deposita en el suelo y por ello, para determinar el contenido de carbono en las raíces, es necesario en primer lugar estimar la biomasa. La biomasa en pie de las raíces depende de la productividad primaria neta del ecosistema; en este sentido, la evidencia

de diversos trabajos realizados en diferentes ecosistemas ha mostrado que las raíces constituyen entre 40 y 85% de la producción primaria neta total (Fogel, 1985). Las estimaciones del carbono contenido en la producción de raíces varía de 25 a 820 g m<sup>-2</sup> año<sup>-1</sup>. Estos valores son el resultado de extraer el carbono liberado por la descomposición del asignado en la producción, y así, más carbono es usado para mantener la respiración que el asignado a la producción de biomasa de raíces finas (Nadelhoffer y Raich, 1992).

Antes de iniciar el siglo xx, las tasas de deposición de nitrógeno eran bajas, y se sabe que la entrada de nitrógeno en los bosques, desde la atmósfera, fue mucho menor a la capturada por las raíces en el suelo. Sin embargo, la deposición atmosférica se ha incrementado por el uso de combustibles fósiles y fertilizantes (Galloway *et al.*, 1995). La productividad primaria subterránea y el ciclo del nitrógeno frecuentemente están correlacionados. Lo anterior es debido a que el crecimiento de las plantas está limitado por la disponibilidad de nitrógeno (Nadelhoffer, 2000). En zonas áridas se han realizado diversos trabajos de fertilización, observando un incremento del crecimiento de las plantas; sin embargo, existe un desconocimiento sobre el efecto sobre las raíces.

### Clasificación y función de las raíces

De acuerdo con su diámetro las raíces pueden ser clasificadas en leñosas y finas. Las leñosas están asociadas principalmente a la función de soporte mecánico de las plantas y proveen la red de conducción de las sustancias asimiladas. Por su parte, las raíces finas están relacionadas con la asimilación de nutrientes del suelo y no sobrepasan los 3 mm de diámetro. El sistema de raíces finas es una parte importante del metabolismo en los ecosistemas terrestres, a tal punto que se ha considerado que la producción de raíces finas en ecosistemas boscosos puede ser superior al 75% de la productividad primaria neta total, además de representar más del 70% del sistema radical (Nadelhoffer y Raich, 1992). Por otro lado, el recambio de las raíces (mortalidad y producción de raíces en relación con la biomasa radical total en pie) es una parte significativa en el ciclo del carbono. Este proceso puede ser muy sensible a muchos de los factores del cambio global (Gill y Jackson,

2000). La descomposición de las raíces libera carbono a la atmósfera y es una vía principal de su transferencia de las plantas al suelo (Dornbush *et al.*, 2002). Este proceso y los dos anteriores determinan la dinámica del carbono en ecosistemas forestales (Makkonen y Helmisaari, 1998). Entonces, a partir de la descripción de la dinámica de las raíces será posible realizar una consideración realista sobre su papel como depósito de carbono.

Las raíces finas ocupan la mayor parte de la biomasa subterránea de las plantas, tienen una gran participación en el flujo de materia y energía en los ecosistemas terrestres y llevan a cabo funciones esenciales en la adquisición de los nutrientes del suelo (Aber *et al.*, 1985). A pesar de su importancia, los problemas metodológicos en el estudio de la dinámica de las raíces finas han dificultado hacer generalizaciones en los diferentes ecosistemas acerca de los controles que actúan sobre su biomasa en pie, producción y recambio (Nadelhoffer y Raich, 1992). En este sentido, se han realizado modelos teóricos que predicen que sobre sitios pobres en nutrientes una mayor proporción de la productividad primaria neta es asignada a las partes subterráneas (Wareing y Patrick, 1975). En contraste, otros modelos (Nadelhoffer *et al.*, 1985) sugieren que la producción de raíces finas puede ser mayor en sitios ricos en recursos. Estos últimos han sido apoyados por experimentos de fertilización que proveen evidencia de que el nitrógeno mineral disponible es un factor importante como limitante del crecimiento (Nadelhoffer *et al.*, 1985, y referencias incluidas). Aún no es claro si la tasa de recambio de raíces finas (*turnover*) se incrementa con una mayor disponibilidad de nutrientes, específicamente nitrógeno (Espeleta y Donovan, 2002), o si esta tasa disminuye (Burton *et al.*, 2000). Además, se conoce poco sobre los procesos que generan la habilidad de las especies para obtener los recursos dentro de las comunidades vegetales (Coomes y Grubb, 2000).

Las raíces mantienen diferentes disposiciones estructurales de acuerdo con las adaptaciones de las especies a las condiciones ambientales, principalmente del suelo. En ecosistemas desérticos la coexistencia de las plantas ha sido explicada por las diferencias temporales en la adquisición de los recursos del suelo (Hipondoka *et al.*, 2003) y por diferencias entre especies en la estructura de sus raíces,

que permite la separación espacial de la explotación de los recursos del suelo (Cody, 1986). La clasificación de formas de vida de las plantas considera la estructura del sistema de raíces, por lo que ésta puede ser indicador de las zonas de explotación de los recursos y las posibilidades de interacción de las especies bajo el suelo (Nobel, 2002). Las plantas con raíces superficiales (p. ej., suculentas) responden al agua disponible en la superficie del suelo y pueden tener acceso a concentraciones relativamente mayores de nitrógeno, que aquellas especies con raíces profundas (i. e., arbustos) que obtienen el agua de las fuentes profundas del suelo, principalmente durante la sequía (Evans y Ehleringer, 1994). Los ecosistemas áridos se caracterizan por la heterogeneidad espacial en la concentración de nitrógeno, siendo mayor en la superficie del suelo y disminuyendo con la profundidad (Evans y Ehleringer, 1993); así no es sorprendente que la mayoría de las raíces de las plantas se encuentren en los primeros 30 cm y es aquí donde la competencia por recursos puede ser más intensa (Casper y Jackson, 1997).

### La reserva de la biosfera Barranca de Metztitlán como sitio propicio para la investigación de la dinámica de raíces en ambientes semiáridos

La reserva mantiene un área importante de matorrales semiáridos con fisonomías y diversidad muy variadas según la especie vegetal dominante. Estos matorrales muestran también un gradiente de perturbación muy amplio, ya que existen zonas completamente transformadas para actividades humanas y zonas muy bien conservadas desde el punto de vista florístico. Otra característica interesante es la cercanía entre los diferentes tipos de matorrales, que frecuentemente se establecen en diversas orientaciones de las laderas; por ejemplo, el matorral crasicaule y el matorral submontano pueden encontrarse colindantes en una misma ladera. Estas características permiten realizar estudios comparativos con ventajas logísticas que en otras áreas del país no se obtienen. A continuación se presentan las características de dos sitios contiguos con diferente tipo de vegetación, en los cuales se han establecido parcelas experimentales donde se desarrollaron los primeros trabajos de dinámica de raíces dentro de la reserva. Cada parcela mide 40 x 50 m (2000 m<sup>2</sup>).

El Sitio 1 es caracterizado por la vegetación denominada matorral crasicaule de *Isolatocereus dumortieri*. La parcela experimental se ubicó sobre una ladera con orientación sureste y con una pendiente de 46°, en una altitud de 1540 m. El suelo es pedregoso y somero, de 50 cm de profundidad; sus características físico-químicas se presentan en la Tabla 1. La comunidad vegetal se caracterizó por la dominancia de la cactácea columnar polipodial *Isolatocereus dumortieri*, cuyos individuos pueden medir hasta 6 m de altura. Otras especies de cactáceas presentes en el sitio fueron *Myrtillocactus geometrizans*, *Opuntia leucotricha* y *Mammillaria longimama*. La cobertura de las cactáceas en la parcela fue de 673.1 m<sup>2</sup>. El estrato arbustivo estuvo representado por *Plumeria rubra*, *Karwinskia humboldtiana*, *Celtis pallida*, *Senna pringlei*, *Pseudosmodium andneuxii*, *Acacia subangulata*, *Montanoa tomentosa*, *Sebastiania pavoniana*, *Brogniartia lupinoides* y *Decatropis bicolor*. Los arbustos ocuparon 513.1 m<sup>2</sup> de la cobertura total en la parcela.

El Sitio 2 es caracterizado por la presencia de matorral submontano. La parcela se ubicó sobre una ladera con orientación suroeste y con una pendiente de 33°, en una altitud de 1578 m. La profundidad del suelo fue de 60 cm, y sus características físico-químicas se presentan en la Tabla 1. El estrato arbustivo dominó la comunidad vegetal, con una cobertura dentro de la parcela de 1092.5 m<sup>2</sup>, donde la altura máxima de los individuos fue de 2 m. Las especies arbustivas son similares a las encontradas en el Sitio 1, incluyendo además *Mimosa biunciphaera*, *Krameria cytisoides*, *Lantana* sp. y *Neopringlea integrifolia*. No se encontraron cactáceas columnares, sólo algunas especies de talla pequeña y con muy baja densidad como *Opuntia leucotricha*, *Mammillaria* sp., *Coryphanta* sp., y *Ferocactus* sp. La cobertura de las cactáceas en la parcela de estudio fue de 73.1 metros cuadrados.

### Un estudio de caso

En enero del 2001 se inició un estudio sobre la dinámica de raíces en los matorrales antes descritos de la reserva de Metztitlán. Este estudio tuvo como objetivos principales: 1. estimar la biomasa en pie de raíces; 2. estimar la productividad hipogea; 3. determinar las diferencias en biomasa y productividad de raíces entre cactáceas y arbustos; 4. determinar la diferencia en productividad de raíces entre ambos

tipos de vegetación; y 5. evaluar el efecto de la deposición de nitrógeno en el suelo sobre la productividad de raíces finas.

Este estudio se desarrolló considerando la hipótesis de que la biomasa de raíces en los matorrales es similar, por lo que se espera que el mayor porcentaje de raíces en un tipo particular de matorral sea de especies con la forma de vida dominante. Así, en el matorral dominado por arbustos la mayor contribución de raíces será dada por esta forma de vida, mientras que en el matorral dominado por cactáceas éstas aportarán un porcentaje de raíces similar a lo que aportan los arbustos en el otro tipo de matorral. Además, se consideró que a mayor cantidad de nitrógeno en el suelo la productividad de raíces finas se incrementaría.

Con la finalidad de estimar el porcentaje de la biomasa vegetal en cada estrato del suelo, se describió la distribución vertical de la biomasa de raíces utilizando el método de trinchera. La producción de raíces en cada una de las parcelas experimentales se estimó con los datos obtenidos a partir de colectas mensuales de suelo y el método máximo-mínimo (ver Pavón, 2005). Las raíces fueron separadas manualmente del suelo y lavadas bajo un chorro de agua usando un tamiz de 0.96 mm<sup>2</sup>. Las raíces obtenidas fueron secadas a 90°C por 48 h y pesadas con una precisión de hasta 0.01 gramos.

En ambos sitios de estudio se realizaron cinco colectas de suelo (0-20 cm de profundidad) obtenidas en los vértices y en el centro de cada parcela. Estas muestras fueron mezcladas para obtener una muestra compuesta de suelo, de la cual se analizaron textura, pH, conductividad eléctrica, materia orgánica, nitrógeno total y fósforo disponible. Durante el periodo de estudio se obtuvieron los registros de la temperatura del aire, evaporación y precipitación de la estación meteorológica de Metztlán, Hidalgo.

El efecto de la deposición del nitrógeno sobre la producción de raíces fue estudiado mediante experimentos de fertilización. El experimento fue realizado durante la época de lluvias, con lo que se evitó que el agua fuera un factor limitante. Tres tratamientos consistentes en diferentes tipos de suelo fueron aplicados en cada parcela: el tratamiento 1 consistió en utilizar el suelo nativo de cada parcela de estudio y sirvió como testigo; el tratamiento 2 consistió en el suelo nativo de cada parcela, al cual se le añadió urea como fertilizante; y en el tratamiento 3 se utilizó un suelo

pobre en nitrógeno, el cual fue transportado de otro sitio (en la Tabla 1 se muestran las propiedades físico-químicas de cada uno de los suelos utilizados). Para el experimento se utilizaron tubos de PVC de 20 cm de largo y 7.5 cm de diámetro, con perforaciones circulares de 19.6 mm<sup>2</sup> separadas a intervalos de 0.5 cm. Para los detalles del diseño experimental y el análisis estadístico se recomienda revisar los trabajos de Pavón (2005, 2007).

Los resultados obtenidos en el estudio fueron muy interesantes y novedosos para los ecosistemas semiáridos y en especial para los matorrales xerófilos del país. La biomasa de raíces en pie para el perfil del suelo fue de 0.66 kg m<sup>-2</sup> (E.S. = 0.07) para el Sitio 1, y de 2.7 kg m<sup>-2</sup> (E.S. = 1.4) para el Sitio 2; estos valores están por encima de las estimaciones realizadas en otros matorrales (Pavón, 2005, 2007). En el Sitio 1 las raíces de cactáceas ocuparon 78% del total, y de éstas 72.9% se encontraron entre 0 y 20 cm de profundidad; las raíces < 1mm de diámetro representaron 71%. El porcentaje de raíces de arbustos a la misma profundidad fue menor, con 54.8%, y las raíces < 1mm de diámetro representaron 58.9%. Para el Sitio 2 el suelo fue más profundo y las raíces se distribuyeron hasta 60 cm de profundidad; las raíces de cactáceas sólo representaron el 3.2% del total, con 82% entre 0 y 20 cm de profundidad. En el Sitio 2 el mayor porcentaje de las raíces de los arbustos (46.7%) se encontraron entre 40 y 60 cm de profundidad; sin embargo, el mayor porcentaje de raíces < 1 mm de diámetro (58.8%) se encontró entre 0 y 20 cm de profundidad.

Los registros mensuales de biomasa en pie de raíces fueron significativamente diferentes entre sitios ( $F = 11.75$ ,  $P < 0.001$ ) y entre clases diamétricas ( $F = 29.38$ ,  $P = < 0.001$ ). Las formas de vida se diferenciaron significativamente sólo en interacción con los sitios ( $F = 214$ ,  $P < 0.001$ ) y con las clases diamétricas ( $F = 5.16$ ,  $P < 0.007$ ). Las raíces muy finas ocuparon en ambos sitios la mayor biomasa y se diferenciaron tanto de las raíces finas ( $P = 0.008$ ) como de las raíces gruesas ( $P < 0.001$ ). En el Sitio 1 la mayor biomasa en pie de raíces, tanto de cactáceas como de arbustos, se registró durante los meses secos. La mayor precipitación ocurrió en septiembre (141 mm), pero sólo se registró 5.7% y 2.4% de la biomasa total para cactáceas y arbustos, respectivamente. Estas diferencias entre

meses no son claras para las raíces de arbustos en el Sitio 2.

Las cactáceas son un elemento importante en la contribución de la biomasa en la superficie del suelo (0-20 cm). En el Sitio 1 dominan sobre los arbustos, que en promedio aportan el 11% (E.S. = 2.36) de la biomasa total. En este sitio las raíces muy finas de cactáceas ocuparon 55.9% (E.S. = 2.92) de la biomasa total. En el Sitio 2, donde los arbustos cubren casi toda la parcela, sus raíces ocuparon 97.3% (E.S. = 1.45), las raíces muy finas tuvieron 69.5% (E.S. = 4.39) del total. Los valores mensuales de biomasa en ambos sitios, separados por forma de vida y clases diamétricas de las raíces, no se correlacionaron significativamente con ninguna de las variables ambientales.

La producción de raíces menores de 3 mm de diámetro se estimó en 3.76 Mg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> y de 2.74 Mg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> para los sitios 1 y 2, respectivamente. Las cactáceas aportaron 80.9% de la producción en el Sitio 1, y los arbustos 83.7% en el Sitio 2. Sólo raíces < 1 mm de diámetro fueron obtenidas en el experimento de gradiente de nitrógeno total en el suelo. El Sitio 1 fue significativamente más productivo (F = 18.12, P < 0.001) y las cactáceas fueron la de mayor producción; en cambio, los arbustos lo fueron en el Sitio 2 (F = 8.49, P = 0.004). El suelo nativo en ambos

sitios de estudio tiene un alto contenido de nitrógeno total (Tabla 1), por lo que este nutriente no es un factor limitante. La producción de raíces fue mayor en este tipo de suelo y difiere significativamente de la producción obtenida, tanto en el suelo enriquecido con urea como en el suelo pobre en nitrógeno total (F = 322.35, P < 0.001). La producción de arbustos y cactáceas difirió significativamente (F = 8.48, P = 0.004), y la interacción entre el sitio, la forma de vida y el tipo de suelo fue significativa (F = 36.88, P < 0.001).

Las raíces menores de 3 mm de diámetro fueron las de mayor proporción en los dos sitios estudiados; esto ha sido descrito para plantas de otros ambientes (Eissenstat y Yanai, 1997). Para el Sitio 1, donde las cactáceas y arbustos ocupan una cobertura similar, ambas formas de vida mantienen el mayor porcentaje de raíces finas y muy finas en la superficie del suelo (0-20 cm de profundidad), por lo que no existe una separación espacial en la distribución de las raíces de absorción y por consiguiente no se reduce la posible interacción competitiva (Casper y Jackson, 1997); por ello la competencia subterránea puede ser considerada para explicar las diferencias entre la proporción de raíces finas y muy finas. En el Sitio 1 las cactáceas tienen el 82.5% del total de las raíces y podrían representar una forma de

Tabla 1

Características físico-químicas del suelo en el área del estudio (\* T = tratamiento)

	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	MO (%)	N <sub>total</sub> (%)	pH	CE (dSm <sup>-1</sup> )	Ca (cmol kg <sup>-1</sup> )	Mg (cmol kg <sup>-1</sup> )	K (cmol kg <sup>-1</sup> )	Na (cmol kg <sup>-1</sup> )	P (mg kg <sup>-1</sup> )
Sitio 1 (T 1*)	56	11	33	9.92	0.5	7	0.33	37.82	4.5	1.47	0.43	29
Sitio 1 (T 2)	52	18	30	13.4	0.67	8.4	1.87	42.38	1.25	1.41	0.76	27
Sitio 1 (T 3)	47	31	22	3.3	0.27	8.1	-	-	-	-	-	-
Sitio 2 (T 1)	44	30	26	12.9	0.65	8	0.56	55	0.8	1.34	0.65	9
Sitio 2 (T 2)	48	27	25	19.3	0.96	8.1	0.51	59	2.9	1.36	0.65	16
Sitio 2 (T 3)	47	31	22	3.3	0.27	8.1	-	-	-	-	-	-

vida dominante en la absorción de recursos del suelo en el Sitio 1. Sin embargo, en el Sitio 2 (en ausencia de cactáceas), la biomasa de raíces finas y muy finas de los arbustos en la superficie del suelo es 1072% mayor con respecto al Sitio 1, aunque sólo la cobertura de los arbustos fuese 113% mayor con respecto al Sitio 1.

Otros factores, como las diferencias en las propiedades físico-químicas del suelo, podrían haber influido en la variación en biomasa de raíces. El fósforo disponible es mucho mayor en el Sitio 1; se ha mostrado en diversos estudios que incrementos de este nutriente aumentan significativamente la producción y mortalidad de las raíces, lo que aumenta la toma de recursos y puede disminuir la biomasa en pie de raíces (Ostertag, 2001; Espeleta y Donovan, 2002). La textura es una propiedad del suelo que influye en la disponibilidad de agua y nutrientes para las plantas (Sperry y Hacke, 2002). Las diferencias en la proporción de arena no son muy grandes entre los sitios; sin embargo, el Sitio 2 tiene 33% de limo mientras que el Sitio 1 tiene 11%. Los suelos limosos (como el Sitio 2) mantienen más agua a bajos potenciales hídricos y están asociados a raíces superficiales; así, en este sitio los arbustos mantienen sus raíces en la superficie del suelo, donde existe un amplio rango de potencial hídrico para la toma de agua por las plantas (Sperry y Hacke 2002).

La producción estimada de raíces finas (3.76 y 2.74 Mg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> para los sitios 1 y 2, respectivamente) se encuentra en el intervalo de producción de raíces (0.53 y 4.43 Mg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>) estimado para otros matorrales (Pavón y Briones, 2000). Las estimaciones de producción de raíces generalmente tienen problemas metodológicos y pueden subestimar la producción (Norby y Jackson, 2000). El método de máximo-mínimo asume que la producción de raíces finas ocurre en pulsos y que la mortalidad no sucede durante ese periodo; sin embargo, no considera la acumulación de biomasa en pie de raíces debida a un lento proceso de descomposición. Esta puede ser la razón por la que en todas las fechas de muestreo se registraron altos valores de biomasa; por tanto, considerar la proporción de raíces vivas y muertas hubiera sido apropiado (Keyes y Grier, 1981), pero en este trabajo no fue posible hacer tal diferenciación.

El suelo nativo en ambos sitios tiene una alta concentración de materia orgánica y nitrógeno total, característico

de los suelos feosem derivados de toba volcánica del área de estudio (Puig, 1991). En este tipo de suelo se registró la mayor producción de raíces finas. La nula producción de raíces en el suelo enriquecido pudo ser consecuencia de un exceso de nitrógeno en el suelo, lo que puede convertir a este nutriente en tóxico e inhibir el crecimiento de las plantas y decrecer la biomasa de las raíces finas (Nadelhoffer 2000). Por otro lado, el tiempo que permanecieron enterrados los tubos y su tamaño pudieron influir en los resultados ya que en otros sitios se ha observado que la respuesta de las raíces a parches de alta fertilidad es lenta y directamente proporcional al tamaño del parche (Van Vuuren *et al.*, 1996).

El trabajo presentado aquí contribuyó a un mayor entendimiento de cómo la dinámica de las raíces finas puede ser afectada por la deposición de nitrógeno derivado de cambio global (Norby y Jackson, 2000).

### Estudios a futuro

En zonas áridas existen muchas carencias en el conocimiento de la dinámica de raíces y en especial si se relaciona con las variables del cambio global. Los estudios descriptivos en ambientes naturales son la base para entender los procesos ecosistémicos que ocurren en el suelo. Sin embargo, es necesario un mayor número de trabajos experimentales para poner a prueba diversas hipótesis concernientes a la dinámica de las raíces en los desiertos. No se sabe el efecto de la temperatura en el *turnover* de las raíces, o si éste se incrementa conforme aumenta la disponibilidad de nitrógeno. No se sabe el efecto de fenómenos climáticos como El Niño o La Niña en la dinámica a largo plazo de las raíces. Ni en los desiertos ni en otros ecosistemas se ha incorporado el papel del sistema de raíces como depósitos de carbono en las estimaciones concernientes al pago por servicios. Otro tema muy poco explorado es el forrajeo de nutrientes por las raíces, es decir, la búsqueda de nutrientes en el suelo horizontalmente. Finalmente, se carece de datos suficientes que evalúen la importancia de la competencia subterránea en la estructura de las comunidades vegetales semiáridas. En conclusión, la investigación en ecología de raíces apenas emerge pero necesita de un mayor número de investigadores interesados en el tema. En México, por ejemplo, se han publicado menos de diez artículos sobre el tema en revistas indexadas.

## Agradecimientos

El autor agradece el apoyo recibido durante la elaboración de este trabajo a la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, al CONACYT y a las autoridades de la reserva de la biosfera Barranca de Metztitlán.

## Referencias

- Aber, J. D., J. M. Melillo, K. J. Nadelhoffer, C. A. McLaugherty y J. Pastor. 1985. Fine root turnover in forest ecosystems in relation to quality and form of nitrogen availability: a comparison of two methods. *Oecologia* 66:317-321.
- Brown, S. 1999. Guidelines for inventorying and monitoring carbon offsets in forest-based projects. Winrock International Institute for Agriculture Development, Arlington, Virginia. 72 p.
- Burton, A. J., K. S. Pregitzer y R. L. Hendrick. 2000. Relationship between fine root dynamics and nitrogen availability in Michigan northern hardwood forests. *Oecologia* 125:389-399.
- Caldwell, M. 2000. Root dynamics and global change: an ecosystem perspective. *Bulletin of the Ecological Society of America* 81:97-99.
- Casper, B. B. y R. B. Jackson. 1997. Plant competition underground. *Annual Review in Ecology and Systematic* 28:545-570.
- Cody, M. 1986. Structural niches in plant communities. In: Diamond J y T. J. Case. (comp.), *Community Ecology*. Harper & Row, New York, p: 381-405.
- Coomes, D. A. y P. J. Grubb. 2000. Impacts of root competition in forests and woodlands: a theoretical framework and review of experiments. *Ecological Monographs* 70:171-207.
- Dornbush, M. E., T. M. Isenhart y J. W. Raich. 2002. Quantifying fine-root decomposition: an alternative to buried litterbags. *Ecology* 83:2985-2990.
- Eissenstat, D. M. y R. D. Yanai. 1997. The ecology of root lifespan. *Advances in Ecological Research* 27: 2-60.
- Espeleta, J. F. y L. A. Donovan. 2002. Fine root demography and morphology in response to soil resources availability among xeric and mesic sandhill tree species. *Functional Ecology* 16:113-121.
- Evans, R. D. y J. R. Ehleringer. 1993. A break in the nitrogen cycle of aridland: evidence from  $^{15}\text{N}$  of soil. *Oecologia* 94:314-317.
- Evans, R. D. y J. R. Ehleringer. 1994. Water and nitrogen dynamics in an arid woodland. *Oecologia* 99:233-242.
- Fogel, R. 1985. Roots as primary producers in below-ground ecosystems. In: Fitter R. (comp.), *Ecological interactions in soil*. Special publications series of the British Ecological Society No. 4, Blackwell Science, London. p: 23-35.
- Galloway, J. N., W. H. Schlesinger, H. Levy III, A. Michaels y J. L. Schnoor. 1995. Nitrogen fixation: anthropogenic enhancement-environmental response. *Global Biogeochemical Cycles* 9:235-252.
- Gill, R. A. y R. B. Jackson. 2000. Global patterns of root turnover for terrestrial ecosystems. *New Phytologist* 147:13-31.
- Harmon, M. E. 2001. Carbon sequestration in forest. *Journal of Forestry* 99:24-29.
- Hipondoka, M. H. T., I. N. Aranibar, C. Chirara, M. Lahavha y S. A. Macko. 2003. Vertical distribution of grass and tree roots in arid ecosystems of Southern Africa: niche differentiation or competition? *Journal of Arid Environments* 54:319-325.
- Hughes, R. F., J. B. Kauffman y V. Jaramillo. 2000. Ecosystem-scale impacts of deforestation and land use in a humid tropical region of Mexico. *Ecological Applications* 10:515-527.
- Keyes, M. R. y C. C. Grier. 1981. Above- and belowground net production in 40-years-old Douglas-fir on low and high productivity sites. *Canadian Journal of Forest Research* 11:599-605.
- Macara, O. M., M. J. Ordóñez y R. Dirzo. 1997. Carbon emissions from Mexican forests: current situation and long-term scenarios. *Climatic Change* 35:265-295.
- Makkonen, K. y H. S. Helmisaari. 1998. Seasonal and yearly variations of fine-root biomass and necromass in a Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stand. *Forest Ecology and Management* 102:283-290.
- Nadelhoffer, K. J., J. D. Aber y J. M. Melillo. 1985. Fine roots, net primary production, and soil nitrogen availability: a new hypothesis. *Ecology* 66:1377-1390.
- Nadelhoffer, K. J. y J. W. Raich. 1992. Fine root production estimates and belowground carbon allocation in forest ecosystems. *Ecology* 73:1139-1147.
- Nadelhoffer, K. J. 2000. The potential effects of nitrogen deposition on fine-root production in forest ecosystems. *New Phytologist* 147:131-139.
- Nobel, P. 2002. *Ecophysiology of roots of desert plants, with emphasis on Agave and Cacti*. In: Waisel A. E. y U. Kafkafi (comp.), *Plant Roots*. Marcel Dekker, New York. p: 961-973.
- Norby, R. J. y R. B. Jackson. 2000. Root dynamics and global change: seeking an ecosystem perspective. *New Phytologist* 147:3-12.
- Oliva, M. y F. García-Oliva. 1998. Un nuevo campo de acción en la química biológica: generalidades sobre el cambio global. *Educación Química*. uam, México. 76 p.
- Ostertag, R. 2001. Effects of nitrogen and phosphorus availability on fine-root dynamics in Hawaiian montane forests. *Ecology* 82:485-499.
- Pavón, N. P. y O. Briones. 2000. Root distribution, standing crop biomass and belowground productivity in a semidesert in México. *Plant Ecology* 146:131-136.

- Pavón, N. P. 2005. Biomass and root production of two plant life form in a semiarid mexican scrub: responses to soil nitrogen availability. *Canadian Journal of Botany* 83:1317-1321.
- Pavón, N. P. 2007. Fine root biomass and production in a semi-arid Mexican shrubland. *The Southwestern Naturalist* 52 (1):116-119.
- Puig, H. 1991. Vegetación de la Huasteca, México. ORSTOM, Instituto de Ecología AC, CEMCA, México. 625 p.
- Sperry, J. S. y U. G. Hacke. 2002. Desert shrub water relations with respect to soil characteristics and plant functional type. *Functional Ecology* 16:367-378.
- Van Vuuren, M. M. I., D. Robinson y B. S. Griffiths. 1996. Nutrient inflow and root proliferation during the exploitation of a temporally and spatially discrete source of nitrogen in the soil. *Plant and Soil* 178:185-192.
- Wareing, P. F. y J. Patrick. 1975. Source-sink relationships and the partition of assimilates in the plant. *En: Cooper J. P. (comp.). Photosynthesis and productivity in diferent environments.* Cambridge University Press. p. 481-500.