

## Impacto acumulado de la agricultura de conservación en propiedades del suelo y rendimiento de maíz

Miguel Ángel Martínez-Gamiño<sup>1§</sup>  
Esteban Salvador Osuna Ceja<sup>2</sup>  
Martín Espinosa Ramírez<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Campo Experimental San Luis-INIFAP. Carretera San Luis Potosí-Matehuala km 14.5, Ejido Palma de la Cruz, Soledad de Graciano Sánchez, SLP. CP. 78430. Tel. 01(800) 0882222. <sup>2</sup>Campo Experimental Pabellón-INIFAP. Carretera Aguascalientes-Zacatecas km 32.5, Pabellón de Arteaga, Aguascalientes, México. AP. 20. Tel. 01(800) 0882222. (osuna.salvador@inifap.gob.mx). <sup>3</sup>Campo Experimental Río Bravo-INIFAP. Carretera Matamoros-Reynosa km 61, Río Bravo, Tamaulipas, México. CP. 88900. Tel. 01(800) 0882222. (espinosa.martin@inifap.gob.mx).

§Autor para correspondencia: martinez.miguelangel@inifap.gob.mx.

### Resumen

La preparación del suelo con barbecho más rastra destruye la estructura del suelo y degrada sus propiedades físicas. La agricultura de conservación es una alternativa que mejora la calidad del suelo y el rendimiento de los cultivos. El objetivo de este estudio fue evaluar el impacto acumulado de la agricultura de conservación en propiedades físicas del suelo y el rendimiento de maíz. El estudio se realizó en un lote experimental con diferentes métodos de labranza y 22 años de antigüedad en el Campo Experimental San Luis, del INIFAP, en Soledad de Graciano Sánchez, SLP. Se compararon los tratamientos de barbecho más rastra (B+R) y labranza cero con 33% de la superficie cubierta con residuos de cultivo (LC+33%C). De 2012 a 2017, se sembró el híbrido de maíz XR-45 en una rotación maíz-avena forrajera de riego. Al no alterar la estructura del suelo con LC+33%C por 22 años, se tuvo un impacto positivo en la porosidad, densidad aparente, infiltración, estabilidad de agregados y resistencia mecánica, lo cual permitió tener un incremento de 51.08% en el rendimiento de maíz respecto al obtenido con B+R. La destrucción de la estructura del suelo con el B+R degrada las propiedades físicas estudiadas y se vio reflejado en un menor rendimiento de maíz. La agricultura de conservación es una alternativa para mejorar la calidad del suelo y el rendimiento de maíz.

**Palabras clave:** dureza, estabilidad, infiltración, porosidad.

Recibido: febrero de 2019

Aceptado: abril de 2019

## Introducción

La mecanización del campo es un gran logro tecnológico de la humanidad, pues aligeró los trabajos de labranza, conducción agronómica y cosecha de los cultivos. Sin embargo, las labores más comunes de preparación del suelo, como el barbecho más rastra, fueron aceptadas y difundidas sin una evaluación científica en cuanto a su efecto en la calidad del suelo y el desarrollo de los cultivos (Faulker, 1974; Figueroa, 1999). La oportunidad de trabajar grandes extensiones motivó su uso y opacó los efectos negativos que desde un inicio se presentaron en el suelo al destruir su estructura y dejarlo sin protección vegetal por largos períodos, expuesto a la acción erosiva del viento y de las lluvias (Tiscareño *et al.*, 1999; FAO, 2015).

La estructura del suelo y su estabilidad desempeñan una función decisiva en una variedad de procesos físicos como la infiltración, retención de humedad, reducción de la erosión, resistencia mecánica a la penetración, desarrollo de raíces y aireación entre otros (Osuna *et al.*, 2006), por lo que su deterioro contribuye a la degradación del suelo, con la consecuente disminución de la producción agrícola y estabilidad ecológica (Huggins y Reganold, 2008). El problema de erosión eólica o ‘dust bowl’, registrado durante la década de los años 1930 en la Gran Planicie en los Estados Unidos de América, es un ejemplo del problema generado al laborear de manera inadecuada los suelos para ser incorporados a la agricultura (Faulkner, 1974).

Al invertir el perfil del suelo se destruyó la cubierta vegetal que lo protegía, así como su estructura, desmenuzando las partículas de suelo, las cuales quedaron expuestas a la acción del viento, generando grandes tolvaneras que ocasionaron un problema de salud en los habitantes y un deterioro en los suelos al ser erosionados y en donde se depositaban dichos sedimentos (Egan, 2006). Ante esta problemática, se generaron desde esa época dos corrientes en la producción agrícola, una que adoptó sin reservas el uso de implementos agrícolas y que desembocó en la revolución verde y la otra, fue la que procuró una agricultura que no disturbara por completo el suelo, dejar residuos de cosecha y rotar cultivos, que actualmente es conocida como agricultura de conservación (Sojka y Upchurch, 1999; Cook *et al.*, 2009). En el Altiplano del centro norte de México, Osuna *et al.* (2016), cuantificaron una pérdida de suelo de 30 t ha<sup>-1</sup> con la labranza convencional en comparación a prácticas de conservación de suelo y agua.

En México, el modelo que más se popularizó como método de preparación del suelo para la siembra de los cultivos y se aceptó sin evidencias experimentales en diferentes climas, tipos de suelo y condición de humedad fue el uso del barbecho y rastra (Figueroa, 1982 y 1999). Los productores y técnicos mexicanos, hasta antes de la década de 1990, fueron educados en base a este modelo de producción agrícola, el cual se mantiene como una de las prácticas más arraigadas en la producción de alimentos en el campo y con una fuerte resistencia al cambio no obstante que en la actualidad se cuenta con información científica de métodos alternativos de preparación del suelo diferentes al tradicional barbecho más rastra (Velásquez *et al.*, 1997; Jasso *et al.*, 2001).

Una alternativa que puede mejorar o solucionar los problemas generados por el excesivo laboreo continuo del suelo es la agricultura de conservación (Reicosky, 2003; Lal *et al.*, 2004; Mitchell *et al.*, 2015). La agricultura de conservación se define por tres acciones principales: a) que el suelo se mueva lo menos posible para realizar la siembra de los cultivos; b) se proteja la superficie del suelo con residuos de cosecha; y c) se practique una rotación de cultivos (Giller *et al.*, 2015).

La degradación del suelo con métodos inadecuados de preparación para la siembra amenaza a más del 40% de los suelos agrícolas y es una influencia negativa en la seguridad alimentaria de una población mundial que para el año 2050 alcanzará los 9 500 millones de personas (Delgado *et al.*, 2011). La producción agrícola está relacionada con la salud del suelo, y la materia orgánica es su principal indicador (Cambardela y Elliot, 1992; Franzluebbers, 2010), además de que un suelo productivo es la mejor defensa de los productores a siniestros climáticos, por lo que incrementar la materia orgánica en el suelo y mejorar su estructura son factores que permitirán dar respuestas sostenibles a la seguridad alimentaria, los efectos del cambio climático y la reducción de la emisión de gases de efecto invernadero según se establece en el tratado de París sobre el cambio climático firmado por varios países, entre ellos México (Naciones Unidas, 2015).

En este tratado se solicita a la comunidad científica internacional generar prácticas de producción agrícola que promuevan incrementar en un cuatro por mil el contenido de la materia orgánica del suelo (Bouma, 2009; Ministerio de agricultura del gobierno de Francia, 2015).

Por más de 50 años, los suelos del Altiplano de San Luis Potosí se han barbechado y rastreado, en donde el resultado de estas acciones ha sido el deterioro de la capacidad productiva del suelo al destruir su estructura y reducir su contenido de materia orgánica (Martínez *et al.*, 2005). Es urgente generar alternativas en la preparación del suelo que permitan revertir y evitar una mayor pérdida en su capacidad productiva. En base a los antecedentes citados, la agricultura de conservación es una alternativa viable para mejorar y conservar la calidad del suelo, de tal forma que el objetivo de este estudio fue evaluar el impacto acumulado de la agricultura de conservación en propiedades físicas del suelo y el rendimiento de maíz.

## **Materiales y métodos**

En 1995 se estableció una parcela de investigación en terrenos del Campo Experimental San Luis, ubicado en el km 14.5 de la carretera 57 tramo San Luis Potosí-Matehuala, en el Ejido de Palma de la Cruz, Soledad de Graciano Sánchez, San Luis Potosí, localizado en las coordenadas 22° 13' 45.78'' Latitud Norte y 100° 51' 01.54'' longitud oeste a una altitud de 1838 m, con temperatura y precipitación media anual de 16.2 °C 210 mm (CGSNEGI, 1995). El tipo de suelo se clasifica como Feozem, de textura franco arcillo arenosa, con 1.4% de materia orgánica, pH de 8.1 y CE de 0.81 dS m<sup>-1</sup> y problemas de compactación en todo el perfil. El agua para riego registró una CE de 0.29 dS m<sup>-1</sup>, RASaj de 1.26, baja en salinidad y sodicidad.

Los tratamientos evaluados fueron: barbecho más rastra (B+R) y labranza cero más 33% de cobertura al suelo (LC+33%C) distribuidos en un diseño de bloques al azar con dos repeticiones y establecidos en parcelas de 10 surcos a 0.825 m entre sí (tratamiento B+R) o cinco camas de 1.65 m de ancho (tratamiento LC+33%C), en ambos casos, la longitud de las parcelas fue de 30 m. En el tratamiento con barbecho, se realizó con un arado de discos a una profundidad de 0.3 m y la rastra se efectuó a una profundidad de 0.15 m. Cada año, el tratamiento de B+R se realizó dos veces al año, una antes de la siembra de maíz y la otra antes de la siembra de la avena forrajera.

De 1995 a 2017 se realizó una rotación maíz-avena forrajera de riego, en donde el maíz se siembra en el ciclo primavera-verano y la avena en el de otoño-invierno. De 2012 a 2017 se sembró el híbrido XR-45. La densidad de población empleada fue de 70 000 plantas por hectárea, con una

separación entre hileras de 0.825 m entre sí y 0.17 m entre plantas. Se fertilizó con la fórmula 200-100-00 con 50% del nitrógeno y 100% del fósforo aplicado en la siembra y 50% restante del nitrógeno en la segunda escarda. Se aplicaron riegos de 10 cm de lámina, cuando de la siembra a inicio de floración se tuvo un abatimiento de la humedad aprovechable de 40% y cuando de la floración a madurez fisiológica se llegó al 70% de la humedad aprovechable.

El control de la maleza antes de la siembra, para el tratamiento LC+33%C, se realizó con la aplicación del herbicida glifosato a 1 400 g ia ha<sup>-1</sup>, y después de la siembra, antes de que emergiera el cultivo, se aplicó herbicida pre emergente atrazina a 0.75 kg ia ha<sup>-1</sup>. En el tratamiento de B+R se realizaron dos deshierbes mecánicos, el primero a los 21 días después de la siembra (DDS) y el segundo a los 35 DDS. El control del gusano cogollero se realizó con el insecticida Spinetoram a 5.87 ia ha<sup>-1</sup>. Para evaluar el rendimiento de maíz grano se tomaron dos muestras al azar de 6 m de longitud por tratamiento en el quinto surco de cada tratamiento. Los resultados se analizaron de acuerdo al diseño de bloques al azar con dos submuestras y dos repeticiones.

Al final del ciclo primavera-verano de 2017, se realizaron las siguientes mediciones a: densidad aparente, infiltración, resistencia mecánica y porosidad. Para la densidad aparente se empleó el método de cilindros con volumen conocido en los estratos de 0.0-0.025, 0.0-0.025-0.1 y 0.1-0.15 m. La infiltración se determinó con el método del doble cilindro, en tres puntos al azar en cada tratamiento y repetición, con una duración de dos horas. La resistencia mecánica se determinó con un penetrómetro digital SC 900 de Spectrum Technologies, Inc., el cual realiza mediciones de la resistencia del suelo cada 0.05 m en un perfil de 0.0 a 0.45 m de profundidad.

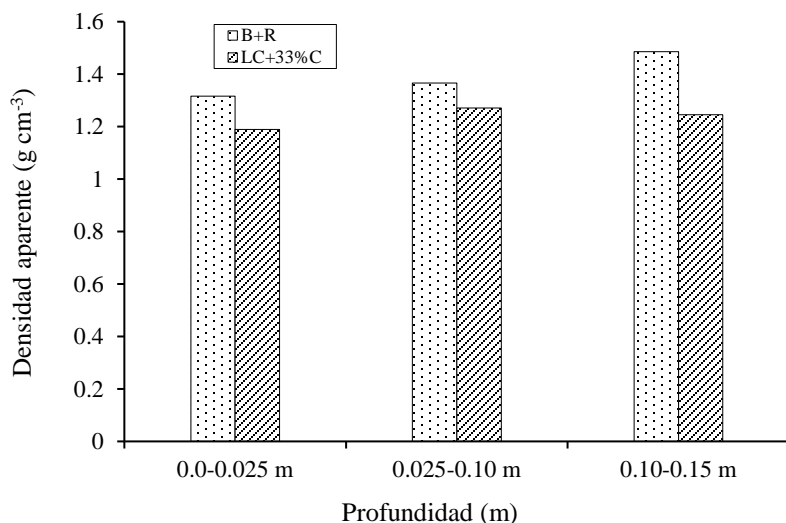
La porosidad del suelo se determinó en los estratos de 0-0.05, 0-0.1, 0-0.2 y 0-0.25 m mediante la obtención de muestras inalteradas de suelo, las cuales se deshidrataron e impregnaron con resina y un pigmento fluorescente (Uvitex) a la luz ultravioleta. Se obtuvieron secciones horizontales a la profundidad de 0.05, 0.1, 0.2 y 0.25 m y analizadas de mediante imágenes digitales con luz blanca y luz ultravioleta (González-Cervantes *et al.*, 2004).

## Resultados y discusión

### Densidad aparente

En la Figura 1 se presentan los valores obtenidos de densidad aparente en los estratos 0-0.025, 0.025-0.1 y 0.1-0.15 m. El análisis estadístico reportó diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) favorable al tratamiento con LC+33%C.

En el tratamiento de B+R se obtuvieron los valores más altos de densidad aparente en las tres profundidades analizadas (1.486 g cm<sup>-3</sup> en el estrato 0-0.15 m), mientras que en el tratamiento con se reportó el valor más bajo (1.189 g cm<sup>-3</sup> en el estrato 0-0.025 m). Lo anterior, indica que el barbecho destruye la continuidad de los poros y la estructura del suelo, además de enviar debajo de la superficie del suelo los pocos residuos del cultivo, incluyendo la raíz. Posteriormente, con el paso de la rastra, los terrones son prácticamente pulverizados, lo cual deja a las partículas del suelo sueltas y susceptibles a ser removidas por el viento o el agua al no contar con ninguna protección vegetal en la superficie (Osuna-Ceja *et al.*, 2006).



**Figura 1. Densidad aparente en diferentes estratos del perfil del suelo, en lote con 22 años de antigüedad con diferentes métodos de labranza en el Campo Experimental San Luis.**

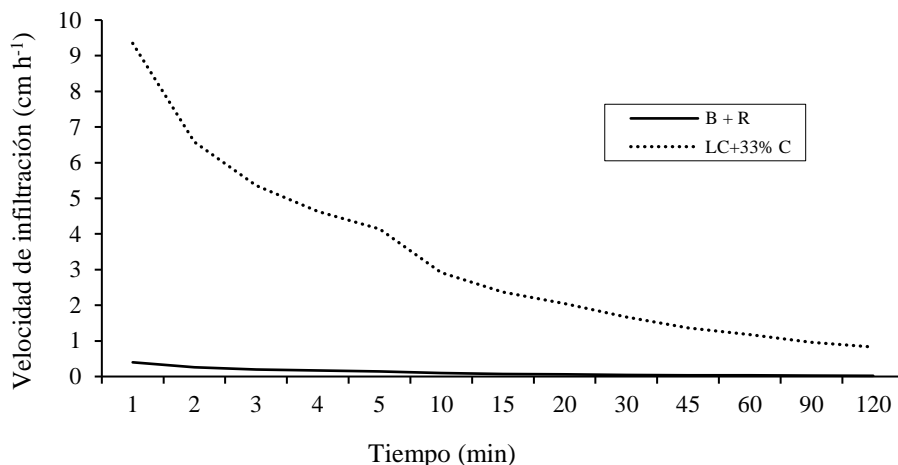
Las partículas de suelo sueltas al entrar en contacto con el agua de lluvia o riego tienden a reagruparse, pero debido a que se remueve casi toda la biomasa de los cultivos y a la oxidación de la materia orgánica al ser expuesta al intemperismo con el barbecho y rastra, el contenido de materia orgánica en el suelo es cada ciclo de cultivo más bajo, por lo que las partículas se adhieren unas a otra formando una estructura apelmazada, con muy poca porosidad, la cual al secarse, por su bajo contenido de materia orgánica se endurece, dificultando el crecimiento de la raíz y en consecuencia del cultivo (Cambardela y Elliott, 1992).

El resultado es que, en un volumen dado, se puede acomodar un mayor peso de suelo, lo cual genera valores más altos de densidad aparente a los obtenidos con labranza cero. En los tratamientos con labranza cero, la estructura del suelo no se destruye, conservando una continuidad en los poros, las raíces permanecen en su lugar y cada año se incrementa el contenido de materia orgánica, por lo que el peso del suelo en un volumen dado fue menor en el tratamiento LC+33%C, lo cual permitió obtener valores menores de densidad aparente a los registrados con B+R.

Al no alterar la estructura del suelo durante 22 años, en el tratamiento LC+33%C, se favoreció la formación de una estructura con mayor porosidad, principalmente en el estrato superior de 0-0.025 m, mientras que en el tratamiento con B+R el suelo se compactó.

### Velocidad de infiltración

Una de las bondades de la agricultura de conservación es el incremento en la velocidad de infiltración en el suelo (Figueroa, 1982; 1999). En la Figura 2 se observa como la infiltración inicial, en la prueba realizada al final del ciclo del cultivo de maíz, con B+R fue de 0.398 cm h<sup>-1</sup> contra 9.398 cm h<sup>-1</sup> en el tratamiento de LC+33%C. La infiltración al final de las dos horas de prueba fue de 0.0201 y 0.8276 cm h<sup>-1</sup> para los tratamientos con B+R y LC+33%C, respectivamente.



**Figura 2. Velocidad de infiltración en lote con 22 años de antigüedad con diferentes métodos de labranza en el Campo Experimental San Luis.**

En el tratamiento con LC+33%C al no alterarse el perfil del suelo con el uso del barbecho, los agregados y la porosidad no se destruyó, por lo que se mantuvo una estructura más porosa, así como una continuidad en la longitud de los poros en el perfil del suelo. Esta mejor porosidad fue el resultado de no alterar con ningún tipo de labranza la estructura del suelo, el aporte de las raíces de las plantas de ciclos anteriores, las cuales después de su descomposición dejan una importante cantidad de macroporos en el estrato superior del suelo, en el caso de la raíz del cultivo de maíz y un importante volumen de raíces de menor diámetro, en el caso de la avena y triticale.

Al mantener y mejorar la porosidad en el tratamiento con labranza cero, las propiedades hidrodinámicas del mismo, especialmente la velocidad de infiltración, se beneficiaron en comparación al tratamiento con B+R. En este tratamiento, se destruyó la estructura del suelo y por consiguiente la porosidad y su continuidad en el perfil del suelo, por lo que la infiltración, en estos tratamientos fue más lenta, lo cual concuerda con lo reportado por Martínez *et al.* (2014).

Otro factor para la baja infiltración en el tratamiento con B+R fue la baja estabilidad de agregados del suelo al entrar en contacto con agua. En la Figura 3 se observan dos agregados, uno del tratamiento con B+R y otro con LC+33%C, antes de ser sumergidos a un mismo volumen de agua.



**Figura 3. Terrones de los tratamientos con B+R y agricultura de conservación (LC+33%C).**

Al entrar en contacto con agua, el terrón con B+R empezó a desbaratarse debido a la presión que el agua ejerció sobre sus partículas, mientras que el terrón con LC+33%C solo desprendió pocas partículas de suelo y a causa del manipuleo ejercido para tomar la muestra (Figura 4).



**Figura 4. A la izquierda, el terrón de B+R empezó a deshacerse al contacto con el agua, a la derecha, el terrón con agricultura de conservación se conservó casi intacto.**

Al cabo de un minuto, en la Figura 5 se observa el tamaño de los dos terrones. El terrón con B+R casi se deshizo. Mientras que el de labranza cero permaneció más íntegro.



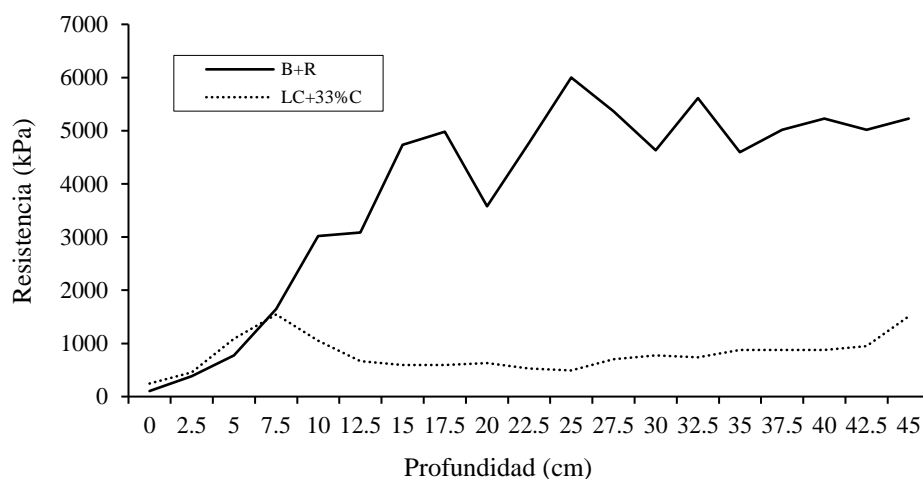
**Figura 5. Tamaño de los terrones con B+R y agricultura de conservación, después de un minuto de ser sumergidos en agua.**

Lo anterior, ayuda a explicar lo que sucede en cada riego o evento de lluvia en el tratamiento con B+R en donde se destruye la estructura del suelo y su contenido de materia orgánica cada ciclo es menor a causa de extraer toda la biomasa de los cultivos año con año. En cada riego o lluvia, los agregados del suelo tienden a destruirse, liberando a las partículas de suelo por la presión ejercida por la lámina de riego o lluvia (Tisdall y Oades, 1982). Estas partículas sueltas provocan una obturación de la poca porosidad presente en este tratamiento, lo cual provoca que la velocidad de infiltración sea muy lenta (Reicosky, 2003; Mitchell *et al.*, 2016).

En cambio, en el tratamiento con labranza cero, los agregados de suelo tienen una mayor estabilidad y no se destruyen ante el contacto con el agua, es decir, sus partículas de suelo están más adheridas entre sí por la materia orgánica que se ha ido acumulando en estos tratamientos, aunado a que los poros tienen una mayor continuidad en el perfil del suelo dado que no fueron destruidos por el barbecho o rastra. En la Figura 3 se puede observar que el terrón con labranza cero presenta mayor cantidad de raíces, las cuales ayudan a sujetar y mantener adheridas a las partículas de suelo más estables que en el terrón de B+R, en el cual prácticamente no se observan residuos de raíces por lo que los agregados no tienen esa capacidad cohesiva que da la materia orgánica, desbaratándose fácilmente al contacto con el agua.

### Resistencia mecánica del suelo

La resistencia mecánica del suelo con diferentes tratamientos de labranza al final del ciclo del cultivo de maíz se presenta en la Figura 6. La compactación del suelo en esa etapa fue mayor en el tratamiento de B+R, a los 25 cm de profundidad, con 6 000 kPa, mientras que la resistencia en el tratamiento de LC+33%C a esa misma profundidad fue de 491 kPa. Lo anterior pone en evidencia el efecto negativo en la calidad del suelo al barbechar y rastrear el suelo como métodos de preparación del suelo para la siembra, dado que se destruye la estructura del suelo y, debido al bajo contenido de materia orgánica, las partículas se reacomodan de una forma masiva y al secarse, se compactan y endurecen el perfil del suelo.



**Figura 6. Resistencia mecánica del suelo con diferentes métodos de preparación al final del ciclo de cultivo con maíz de riego en el Campo Experimental San Luis.**

Tradicionalmente se considera al barbecho más rastra como el único método para preparar el suelo para la siembra. Por una parte, los productores tienen razón al escoger este método tradicional, pues de acuerdo a la información de la Figura 6, la dureza en el perfil del suelo de 0 a 0.45 m es muy alta. Con esa dureza, técnicamente no se recomienda realizar una siembra directa, pues se tendrían problemas para depositar la semilla a una profundidad adecuada para su germinación. Posteriormente, las raíces del cultivo no se desarrollarían y en consecuencia el cultivo tampoco.

Ante una dureza de esta magnitud, incluso arriba de los 2 000 kPa, (Figuroa, 1999; FAO, 2015), recomiendan emplear labores tales como el subsuelo, barbecho y rastra para descompactar y reducir la dureza del suelo y favorecer la siembra, emergencia y desarrollo del cultivo.



Al barbechar y rastrear el suelo se genera un círculo vicioso, debido a que al inicio del cultivo el suelo está totalmente suelto, no representa un obstáculo para la germinación de las semillas, sin embargo, al final del ciclo, la dureza que presenta el suelo no deja otra alternativa que emplear otra vez el barbecho más rastra. Al realizar la siembra directa, en el tratamiento con LC+33%C, en camas permanentes de 1.65 m de anchura, la siembra se realiza en hileras separadas 0.825 m. Al coincidir la siembra de los cultivos, año con año, se favorece la acumulación de las raíces y tocones del tallo que quedan después de cortar la parte aérea del maíz y avena o triticale. Esta acumulación de materia orgánica en esa zona de siembra permitió que el suelo no se compactara a niveles como los reportados en el tratamiento de B+R.

La presencia de restos de raíces mejoró la estructura del suelo y la estabilidad de los agregados del suelo (Tisdall y Oades, 1982) y facilitó el desarrollo de nuevas raíces, las cuales van a contribuir a un mejor desarrollo de la raíz del cultivo siguiente (Sojka y Upchurch, 1999). Aquí se rompe el círculo negativo de endurecimiento del suelo y se genera un círculo positivo en donde cada ciclo los residuos de las raíces favorecerán un mejor desarrollo de la raíz del cultivo siguiente. Esa es la razón por la cual los valores de dureza del suelo en el tratamiento con labranza cero reportó valores menores a los 1 600 kPa en el perfil del suelo al final del ciclo del cultivo de maíz.

En los años 2015 y 2017, este efecto positivo, generado por la acumulación de raíces en la zona de siembra de las camas permanentes, coadyuvó para obtener una emergencia de la densidad de población superior al 95% después de una lluvia de sólo 5 mm, mientras que en el tratamiento con B+R la emergencia de plantas se afectó en 45%. Debido a la poca estabilidad de los agregados y la poca materia orgánica del suelo, en el tratamiento con B+R, la ocurrencia de 5 mm de lluvia fueron suficientes para generar una costra seca y dura, en la superficie del suelo, que impidió la emergencia normal de las plántulas de maíz.

La compactación del suelo en el tratamiento con B+R inició desde la primer lluvia o riego de auxilio y llegó a su máximo al final del ciclo del cultivo. Esta compactación afectó el desarrollo normal del maíz durante todo el ciclo. En la Figura 7 se presenta el efecto de esta compactación del suelo en el desarrollo del cultivo de maíz a los 45 días después de la siembra en el tratamiento B+R, observándose como el suelo se agrieta y endurece al secarse.



Figura 7. Compactación del suelo en el tratamiento con B+R.

En la Figura 8 se observa que en el tratamiento de LC+33%C no hay indicios de que el suelo este compactado.



**Figura 8. Sin grietas en la superficie del suelo como indicador de una menor compactación del suelo en el tratamiento LC+33%C.**

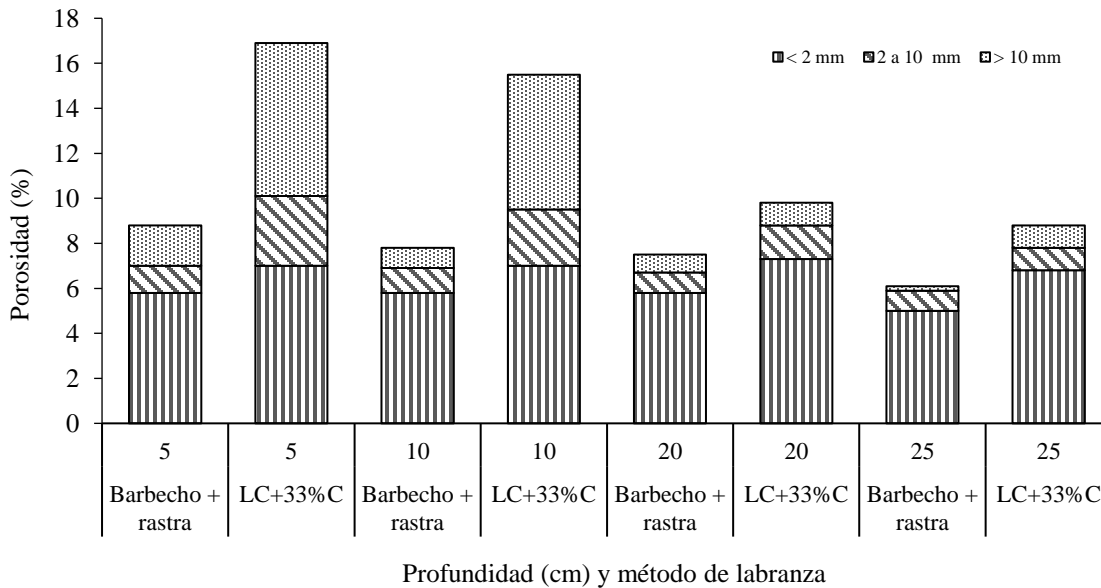
## Porosidad

La porosidad del suelo se genera por la agregación de las partículas de suelo y es afectada por la cantidad de materia orgánica, edafo fauna y estabilidad de los agregados del suelo (Huggins y Reganold, 2008). En la Figura 9 se presentan los valores de porosidad en los tratamientos de B+R y LC+33%C en los estratos de 0-0.05, 0.05-0.1, 0.1-0.2 y 0.2 a 0.25 m. La porosidad total en todas las profundidades evaluadas fue superior en el tratamiento LC+33%C en relación al B+R.

Sobresale que, en las capas de 0-0.05 y 0.05-0.1 m, la porosidad total fue superior en 86 y 100% en el tratamiento con LC+33%C en relación con la observada en B+R. Estos resultados concuerdan con los valores de menor densidad aparente para el tratamiento de LC+33%C, donde al no destruir la estructura del suelo con ningún labranza, permitió mantener y mejorar la agregación de las partículas de suelo, además de contar con la presencia de poros formados por la descomposición de las raíces y la actividad de la edafo fauna en los primeros 10 cm, mientras que en el tratamiento con B+R el suelo inició de nueva cuenta la generación de espacios porosos a partir de la agregación de las partículas de suelo y la presencia de raíces después de haber sido barbechado y rastreado.

En la Figura 9 se observa que, de la porosidad total en el tratamiento con LC+33%C, el 39% correspondió a los macroporos (diámetro >10 mm) contra 16% en B+R. Los macroporos corresponden a los poros dejados por las raíces y la edafo fauna y que han tenido un efecto acumulado en el tratamiento con cero labranza, mientras que con el B+R se destruyen durante la preparación del suelo antes de la siembra de maíz y avena o triticale.

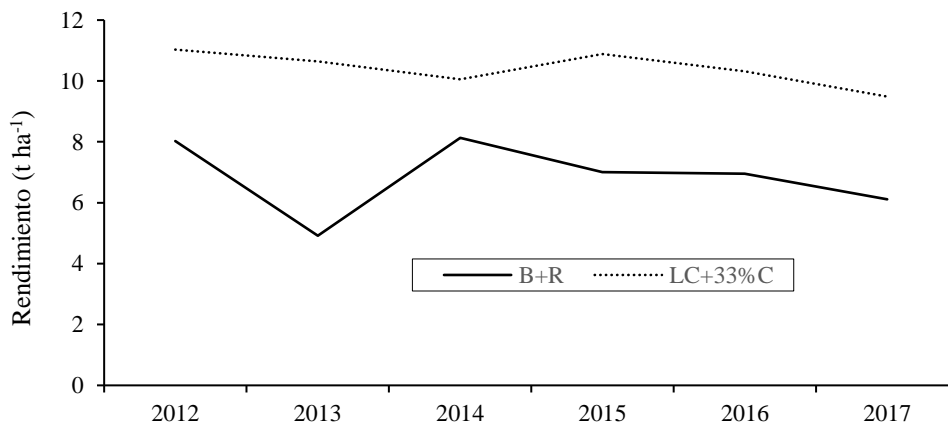
Los mesoporos (diámetro entre 2 y 20 mm) guardaron un porcentaje respecto a la porosidad total de 17 y 13.5% para B+R y LC+33%C, respectivamente. Estos resultados ayudan a explicar la diferencia en la velocidad de infiltración, pues el tratamiento de LC+33%C presentó macroporos desde la superficie hasta una profundidad de 0.25 m, con lo cual el agua se infiltró con mayor rapidez que en el B+R, en donde el porcentaje de macroporos fue menor.



**Figura 9. Porosidad del suelo a diferentes profundidades del perfil del suelo con diferentes métodos de labranza en el Campo Experimental San Luis.**

### Rendimiento de maíz

El análisis estadístico reportó diferencia entre medias de tratamientos (Tukey,  $\alpha= 0.05$ ) favorable al tratamiento con labranza cero. En la Figura 10 se presenta el rendimiento de grano de maíz obtenido en el período de 2012 a 2016, en donde se observa que el rendimiento de grano de maíz en el tratamiento con labranza cero fue en promedio 51.68% superior al registrado con el tratamiento de B+R en los últimos cinco años. El rendimiento de grano es el resultado que refleja las condiciones ambientales que tuvo el cultivo durante su período de desarrollo. En el tratamiento con labranza cero el suelo registró menor compactación, mayor porosidad, mayor aporte de materia orgánica al suelo, más estabilidad de agregados y mayor velocidad de infiltración, por lo que el cultivo tuvo mejores condiciones en el suelo para lograr rendimientos superiores a las 10 t ha<sup>-1</sup>.



**Figura 10. Rendimiento de grano de maíz con diferentes métodos de labranza en el Campo Experimental San Luis en el período de 2012 al 2017.**

## Análisis financiero

En el Cuadro 1 se presenta un análisis financiero entre los tratamientos de B+R y LC+33%C para determinar el costo de producción de un kilogramo de maíz.

**Cuadro 1. Análisis financiero para determinar el costo de producción de un kilogramo de maíz con diferentes métodos de labranza en el Campo Experimental San Luis.**

Concepto	B+R	LC+33%C
Barbecho (\$ ha <sup>-1</sup> )	1 000	0
Rastra (\$ ha <sup>-1</sup> )	500	0
Herbicida (\$ ha <sup>-1</sup> )	0	600
Surcado (\$ ha <sup>-1</sup> )	300	0
Fertilización (dosis 180-80-00)	6 200	6 200
Riegos (\$ ha <sup>-1</sup> )	5 000	5 000
Semilla (65 000 semillas ha <sup>-1</sup> )	3 850	3 850
Escarda (\$ ha <sup>-1</sup> )	450	0
Control de arvenses (\$ ha <sup>-1</sup> )	650	650
Control de plagas (\$ ha <sup>-1</sup> )	650	650
Trilla (\$ ha <sup>-1</sup> )	2 400	2 400
Costo total (\$)	21 000	19 350
Rendimiento (t ha <sup>-1</sup> )	6 858	10 402
Ingreso bruto (\$)	34 290	52 010
Costo para producir un kilogramo de maíz (\$)	3.062	1.86

Para B+R el costo de producción de una hectárea fue de \$21 000.00, por lo que el costo para producir un kilogramo de maíz fue de \$2.997. Para el caso del tratamiento con labranza cero, los costos de producción fueron de \$19 350.00 y el de producir un kilogramo de maíz fue de \$1.828. La diferencia en los costos de producción entre estos dos tratamientos fue el costo de la preparación del suelo con barbecho y rastra, con un valor de \$1 500.00 más \$450.00 de la escarda, para un subtotal de \$1 950.00.

En el tratamiento con LC+33%C se emplearon \$600.00 para el control de arvenses antes de la siembra, por lo que se obtuvo un ahorro de \$1 350.00 por hectárea en relación al B+R. En este análisis financiero no se refleja el beneficio que la agricultura de conservación deja en el suelo, como lo es el incremento de la materia orgánica, mejor estabilidad de agregados del suelo e infiltración y menor compactación, entre otros factores.

## Conclusiones

Al no alterar la estructura del suelo durante 22 años en el tratamiento de LC+33%C, se propició una diferencia en la porosidad de los primeros 0.1 m, superior en 100% a la registrada en el tratamiento de B+R. La diferencia en porosidad se vio reflejada en una menor densidad aparente menos compacta en el tratamiento de LC+33%C y más compacta en el de B+R. La infiltración inicial en el tratamiento de LC+33%C, se afectó favorablemente por la mayor porosidad y densidad

aparente en este tratamiento al registrar un valor de 9.398 cm h<sup>-1</sup>, mientras que en el tratamiento con B+R, la infiltración inicial fue afectada por la menor porosidad y mayor densidad aparente y registrar un valor de solo 0.398 cm h<sup>-1</sup>.

La resistencia mecánica del suelo en el tratamiento B+R registró un valor de hasta 6000 KPa, mientras que en el tratamiento con LC+33%C, el valor máximo fue de 1544 KPa. El rendimiento de maíz grano fue superior con el tratamiento de LC+33%C dada las diferencias en la calidad del suelo en el tratamiento de LC+33%C en comparación al tratamiento con B+R. Los costos de preparación del suelo se redujeron de \$1 800.00 con B+R a \$600.00 con LC+33%C. El costo de producción de un kilogramo de maíz se redujo en 39% con LC+33%C en relación con el obtenido con B+R.

### Literatura citada

- Bouma, J. 2009. Soils are back on the global agenda: Now what? *Geoderma*. 15:0224-225.
- Cambardela, C. A. and E. T. Elliott. 1992. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56:777-783.
- CGSNEGI. 1995. Cuaderno estadístico municipal. Soledad de Graciano Sánchez. Estado de San Luis Potosí. 4-5 pp.
- Cook, B. I.; Miller, R. L. and Seager, R. 2009. Amplification of the North American 'Dust Bowl' drought through human induced land degradation. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 106:4997-5001.
- Delgado, J. A.; Groffman, P. M.; Nearing, M. A.; Goddard, T.; Reicosky, D.; Lal, R.; Kitchen, N. R.; Rice, C. W.; Towery, D. and Salon, P. 2011. Conservation practices to mitigate and adapt to climate change. *J. Soil Water Conserv.* 66(4):118A-129A.
- Egan, T. 2006. *The worst hard time: the untold story of those who survived the Great American Dust Bowl*. Mariner Books. 340 p.
- FAO. 2015. *The impact of natural hazards and disasters on agriculture and food and nutrition security: a call for action to build resilient livelihoods*. Rome.
- Faulkner, E. H. 1974. *Plowman's folly*. Oklahoma University Press. USA. 138 p.
- Figueroa, S. B. 1982. La investigación en labranza en México. *In: Memorias del XV Congreso Nacional de la ciencia del suelo*. México. 273 p.
- Figueroa, S. B. 1999. *Manual de producción de cultivos con labranza de conservación*. Colegio de Posgraduados. Montecillo, Estado de México. 273 p.
- Franzluebbers, A. 2010. Will we allow soil carbon to feed our needs? *Carbon management*. 1(2):237-251.
- Giller, K. E.; Andersson, J. A.; Corbeels, M.; Kirkegaard, J.; Mortensen, D.; Erenstein, O. and Vanlauwe, B. 2015. Beyond conservation agriculture. *Frontiers Plant Sci.* 6(870):1-14.
- González, C. G.; Sánchez, C. I. y Rossignol, J. P. 2004. Morfología de los poros de circulación preferencial del agua en el suelo mediante técnicas de análisis de imagen. Caso de una cuenca del norte de México. *Ing. Hidráulica en México*. 19(3):15-23.
- Huggins, D. R. and Reganold, J. R. 2008. No-till: the quiet revolution. *Scientific American*. 71-77 pp.
- Jasso, C. C.; Hernández, A. J. A. y Martínez-Gamiño, M. A. 2001. *Tecnología para la producción rentable de maíz bajo riego en el Altiplano de San Luis Potosí*. San Luis Potosí, México. Folleto para productores núm. 25. 14 p.

- Lal, R. 2004. Soil carbon sequestration impacts of global climate change and food security. *Science*. 304:1623-1627.
- Martínez, G. M. A., Jasso, Ch. C.; Osuna, C. E.; Reyes, M. L.; Huerta, D. J. y Figueroa, S. B. 2014. Efecto del fertirriego y labranza de conservación en propiedades del suelo y el rendimiento de maíz. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 5(6):16-23.
- Ministerio de Agricultura del Gobierno de Francia. 2015. La iniciativa 4/1000. Los suelos como base de la seguridad alimentaria y el clima. 8 p.
- Mitchell, J. P.; Carter, L. M.; Reicosky, D. C.; Shrestha, A.; Pettygrove, G. S.; Klonsky, K. M.; Marcum, D. B.; Chessman, D.; Roy, R.; Hogan, P. and Dunning, L. 2015. A history of tillage in California's Central Valley. *Soil Till. Res.* 157:52-64.
- Mitchell, J. P.; Shrestha, A.; Mathesius, K.; Scow, K. M.; Southard, R. J.; Haney, R. L.; Schmidt, R.; Munk, D. and Horwath, S. 2016. Cover cropping and no-tillage improve soil health in an arid irrigated cropping system W. R. in California's San Joaquin Valley, USA. *Soil Tillage Res.* 165:325-335.
- Naciones Unidas. 2015. Convención Marco sobre el cambio climático. París. 40 p.
- Osuna, C. E. S. Figueroa, S. B.; Oleschko, K.; Flores, D. Ma. de L.; Martínez, M. M. R. and González, C. F. V. 2006. Effect of soil structure on root growth of maize with two tillage systems. *Agrociencia*. 40:27-38.
- Osuna, C. E. S.; Martínez, M. A. G.; Borja, B. M.; Rojas, S. C. and Padilla, R. J. S. 2016. Sustainable system for dry bean production under dryland conditions. *Bean Improv. Coop.* 59:239-240.
- Reicosky, D. 2003. Conservation agriculture: global environmental benefits of soil carbon management. *In: conservation agriculture*. Garcia-Torres, L. (Eds.) 3-12 pp.
- Sojka, R. H. and Upchurch, D. B. 1999. Reservation regarding the soil quality concept. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63:1049-1054.
- Tiscareño, L. M.; Báez, A. D.; Velásquez, V. M. A.; Potter, K. N.; Stone, J. J.; Tapia, M. V. and Claverán, R. A. 1999. Agricultural research for watershed restoration in central México. *J. Soil Water Cons.* 54:686-692.
- Tisdall, J. M. and Oades, J. M. 1982. Organic matter and water stable aggregates. *J. Soil Sci.* 33: 141-163.
- Velásquez, V. M. A.; Tiscareño, M. L.; Claverán, R. A. y Gallardo, M. V. 1997. Erosión y productividad bajo labranza de conservación. *Avances de investigación en suelos de ando de Michoacán. Folleto técnico Núm. 1. CENAPROS-INIFAP.* 34 p.