

MANEJO AGRONÓMICO DE SUELOS ENDURECIDOS (TEPETATES) DEL EJE NEOVOLCÁNICO DE MÉXICO

Aurelio Báez Pérez¹, Jorge D. Etchevers Barra¹, Christian Prat², Alfonso Márquez Ramos y Eduardo Ascencio Zapata

¹Colegio de Postgraduados, Montecillo (México) e ²Institut de Recherche pour le Développement (Francia). <pbaez@colpos.mx>, <jetchev@colpos.mx> y <prat@ird.fr>

Resumen: El Eje Neovolcánico de México (ENM) presentan afloramiento de capas endurecidas (llamadas tepetates) por erosión de los suelos superficiales. Estas capas no pueden ser cultivadas sin una habilitación previa (roturación, nivelación, bordes, fertilización), que ha sido afinada a lo largo de las últimas décadas. La mencionada zona posee una alta densidad poblacional, atrae y expulsa mano de obra, es base de grandes centros urbanos y presenta escasez de tierra laborable en esa región. De ahí el interés en la habilitación de los tepetates para la producción. El significado técnico-científico de tepetate es una capa de toba, flujo piroclástico o depósitos de antiguas cenizas volcánicas endurecidas, en diversas profundidades del perfil, particularmente en climas con dos estaciones muy marcadas, una seca y otra lluviosa. En el ENM de Tlaxcala y México existirían aproximadamente 30.700 km² de estos materiales, pero también los hay en los Estados de Michoacán, Hidalgo y Querétaro. Se reconocen dos tipos de tepetates: duripán y fragipán. Los primeros están endurecidos durante todo el año y los segundos son duros durante la estación seca, pero blandos en la húmeda y pueden ser trabajados mecánica o manualmente. Naturalmente tienen una baja concentración de C, por lo que su habilitación para la agricultura pudiese contribuir a capturar de C atmosférico. En este escrito presenta información técnica producto de varios años de trabajo referente a la incorporación de los tepetates a la agricultura, la mayoría generada en el marco de programa de investigación de suelos volcánicos endurecidos en los Estados de México y Tlaxcala, financiados por la Unión Europea, con participación de los Estados e instituciones nacionales.

A lo largo de los años ha sido posible reunir un conjunto de elementos de manejo, suficientes para definir condiciones de producción óptimas para la incorporación de los tepetates a la agricultura. El control de la erosión, la adecuada selección de cultivos, la rotación, la asociación de gramíneas con leguminosas, la adición de abonos químicos y orgánicos en cantidades definidas en función de la demanda, y las técnicas de captación de agua de lluvia, son indispensables para obtener buenos resultados en los primeros años de cultivo en siembras de temporal (época de lluvia). Los sistemas asociados de gramíneas con leguminosas son mucho más productivos que los sembrados en monocultivo. Se concluyó que no era necesario roturar a una profundidad mayor de -45 cm para tener más capacidad de reserva de agua, porque la precipitación y la evapotranspiración históricas de la región no permiten un almacenamiento mayor de agua.

Roturar a -60 cm de profundidad es 30% más caro que -45 cm y no se justifica. La intensidad y distribución de las lluvias en el tiempo conducen en muchos casos, a la rápida formación de costras en la superficie del tepetate habilitado, lo que limita la infiltración y dificultando que éste se llene.

Palabras clave: Horizontes endurecidos, Tepetates, Manejo agronómico, Producción agrícola en condiciones extremas.

***Agronomic management of indure volcanic layers (tepetates)
habilitated for agricultural production
in the transmexican volcanic belt***

Abstract: The Mexican Volcanic Belt (ENM) shows outcrops of hardened layers (called tepetates), as a result of the erosion of surface soils. These layers can not be cultivated without a previous fitting out (breaking up, levelling, edges, fertilization) that has been improved over the last decades. The area mentioned is highly populated; it attracts and expels workforce, and is largely the basis of vast urban zones; and it has not much land for agricultural activity. This explains the interest in fitting out tepetates for production. The tepetate is technically and scientifically defined as a layer of tuff, pyroclastic flow or derived from old hardened volcanic ashes located at different depth levels of the profile, especially in climates with two very distinct seasons, dry and rainy. In the ENM of Tlaxcala and Mexico States there may be approximately 30.700 km² of these materials, but they are also present in the states of Michoacán, Hidalgo and Querétaro. There are two types of tepetates: the duripan type and the fragipan. The former are hardened all year round and the latter only during the dry season, but soft in the wet months, and can be mechanically or manually handled. Naturally they have a low concentration of C; the that their fitting out for agriculture might contribute to capture atmospheric C. This paper presents technical information resulting from many years of study focused on the incorporation of tepetates into agriculture, developed in the framework of the research program of hardened volcanic soils in the States of Mexico and Tlaxcala, funded by the European Union, jointly with some Mexican states and institutions.

Over the years it has been possible to gather sufficient management information to define the optimum production conditions for the incorporation of tepetates into agriculture. The control of erosion, the adequate selection of crops, rotation, the combination of gramineae with legumes, the addition of chemical and organic fertilizers in amounts depending on the demand, and the techniques for the rain water harnessing are all indispensable to obtain good results over the first years of rainfed cultivation. The associated systems of gramineae and legumes are much more yielding than those under monoculture. It was concluded that it was not necessary

to break up to more than -45 cm deep in order to have a larger water reserve capacity, because the regular rainfall and evapotranspiration of the region do not bring enough water to fill the reservoir. Breaking up as deep as -60 cm is 30% more expensive than -45 cm, so it is not worth it. The intensity and distribution of rainfalls over time often results in the rapid formation of crusts on the surface of the fitted tepetate, which limits infiltration making it difficult for it to be filled up.

Key words: Indure layers of volcanic origen, tepetates, agronomic management, agricultural production under extreme conditions

INTRODUCCIÓN

Las áreas de agricultura de temporal (en temporada de lluvias) de los piedemontes correspondientes a la parte central del Eje Neovolcánico de México presentan algunas limitaciones para su desarrollo, que pueden ser identificadas por cualquier observador experto: baja disponibilidad de agua, elevado grado de degradación de los suelos, escasa profundidad de los mismos y, en muchos casos, presencia de una erosión irreversible y afloramiento de capas endurecidas, localmente conocidas como tepetate.

Tepetate, en México, es una expresión que vernáculamente se refiere a cualquier capa de suelo endurecida. Su nombre deriva del término *náhuatl* "tepetatl" que significa cama de piedra. Williams (1992) señaló que ya en el siglo XVI la expresión era usada para clasificar materiales asociados a la tierra; se empleaba para designar tanto materiales ligeramente friables con consistencia rocosa como un suelo arable. Ortiz y Gutiérrez (1999) aclararon que tal ambigüedad provendría del uso en la clasificación campesina antigua, de dos términos similares, *tepetatl* cuyo significado ya fue explicado y *tepetlatali*, que se refiere a tierras trabajables y que serían sinónimos. El significado técnico-científico moderno de tepetate y su equivalentes en otros países (talpetate, cangahua) es de una capa de tobas, flujos piroclástico o antiguas cenizas volcánicas endurecidas, incorporadas en el perfil o aflorando en la superficie (por erosión del suelo superficial), que se encuentran principalmente en áreas de influencia volcánica, particularmente en climas con dos estaciones muy marcadas, una seca y otra lluviosa (Etchevers *et al.*, 2006).

No existe una cuantificación confiable de la extensión de los tepetates en la República Mexicana. En la parte central del Eje Neovolcánico de México existirían, según Peña y Zebrowski (1992, 1993), aproximadamente 30.700 km² de estos materiales, principalmente en los Estados de Tlaxcala y México, pero también los hay en los Estados de Michoacán, Hidalgo y Querétaro, aunque su superficie no ha sido cuantificada. Werner (1992) estimó que 54% de la extensión del Estado de Tlaxcala exhibe estas capas endurecidas, muchas afloradas (en más de una quinta parte de su territorio) y el resto enterradas. Sin embargo, es de suponer que el grado

de erosión actual es mayor que el de hace más de 15 años atrás, por lo que la superficie de tepetates aflorados en ese Estado sería mayor que la señalada por el último autor mencionado.

En términos generales se reconocen dos tipos de tepetates: los tipos duripán y los de fragipán (Peña y Zebrowski, 1992; Hidalgo, 1996). Los tepetates tipo duripán permanecen endurecidos durante todo el año; sin embargo, los tipo fragipán son duros durante la estación seca, pero blandos en la húmeda y pueden ser trabajados mecánica o manualmente e incorporados a la actividad económica rural. Por lo anterior, los tepetates constituyen una importante reserva de tierra que, con inversiones moderadas, pueden ser habilitados para la producción agrícola, pecuaria o forestal. Simultáneamente, una vez habilitados para la producción agrícola o forestal pueden contribuir a capturar carbono atmosférico, dado su bajo contenido inicial de este elemento y su capacidad para almacenarlo como lo han demostrado (Báez *et al.*, 2007). En los Estados Tlaxcala y de México su importancia estratégica es tanto mayor, por ser entidades que se caracterizan por poseer una elevada densidad poblacional (producto de flujos migratorios del interior del país que buscan mejores oportunidades de trabajo), pero al mismo tiempo ser entidades emisoras de flujos migratorios hacia los países del Norte del continente. La expulsión de población es causada, entre otras situaciones, por la falta de tierra de labor y el empobrecimiento de ésta, por el mal manejo y por la erosión de la misma. Tal situación pone de manifiesto la necesidad de considerar como una estrategia de retención poblacional, la recuperación de la mayor cantidad posible de suelos que presenten degradación, ya sea por razones naturales o por acción del hombre, para reducir los flujos migratorios y asentar permanentemente a los habitantes del sector rural.

En este trabajo se presenta información técnica sobre prácticas de manejo para la incorporación de los tepetates a la agricultura generada en el marco del programa de investigación de suelos volcánicos endurecidos en los Estados de México y Tlaxcala (México); siendo el objetivo la captación de C atmosférico.

RECOMENDACIONES DE MANEJO PARA LA INCORPORACIÓN DE LOS TEPETATES A LA PRODUCCIÓN AGRÍCOLA, PECUARIA Y FORESTAL

Los tepetates que han aflorado y se encuentran en la superficie del paisaje son incapaces de sostener una cubierta vegetal. Sus condiciones físicas naturales, como la dureza, no permiten la penetración de las raíces de las plantas; la estructura es tal, que el agua difícilmente penetra a su interior y no puede ser almacenada; y su ambiente químico no es adecuado para el desarrollo de las plantas, ya que carecen de nitrógeno y fósforo en

cantidades suficientes (Arias, 1992; Werner, 1992; Etchevers *et al.*, 1992; Báez, 1998). La incorporación de los tepetates a la actividad productiva comienza con su acondicionamiento físico para inducirlo a soportar vegetación.

ROTURACIÓN

La roturación y en determinados casos, la construcción de terrazas es el paso inicial y fundamental en la habilitación de los tepetates tipo fragipán para la agricultura, forestería y actividades pecuarias. Tales prácticas se han realizando desde la época precolombina (Hernández, 1987) y tiene por objetivo permitir la colonización de la capa roturada por las raíces de las plantas, aumentar la capacidad de almacenamiento de agua y su retención por periodos prolongados, lo cual es básico para el establecimiento de cualquier especie vegetal (Báez, 1998). La roturación debe hacerse a aproximadamente 40-45 cm. Se ha observado que roturaciones a mayores profundidades carecen de utilidad, porque el agua caída raramente logra penetrar más allá de este límite (Báez *et al.*, 1997; Prat *et al.*, 1998). Para tal trabajo se prefiere un tractor tipo *Caterpillar* (D7 o D8) equipado con dos cinceles o rippers (Werner, 1992). El trabajo que realiza este implemento es bastante rudo, por lo que se requiere luego del uso de un arado de disco que suavice la superficie del terreno. Generalmente la forma y pendiente de los terrenos determinan el diseño de la parcela para la futura operatividad de las labores agrícolas. La pendiente final de la parcela roturada debe permitir la máxima infiltración del agua de lluvia caída y el escurrimiento lento en caso de exceso de ésta.

Se ha probado que una manera eficiente de realizar la roturación del lecho de tepetate es hacer primero un paso con la maquinaria pesada en una dirección lineal, con espaciamiento de 30 cm entre las líneas penetradas por los cinceles. El segundo paso se hace perpendicular al primero, como si se marcara una cuadrícula. El tiempo de roturación promedio para esta operación, considerando una profundidad media de 40-45 cm, es de 26 hr ha⁻¹; pero si se aspira a roturar a una profundidad de -60 cm el tiempo de máquina sube a 68 hr ha⁻¹, lo cual encarece innecesariamente el trabajo.

CONSTRUCCIÓN DE TERRAZAS

La construcción de terrazas es una alternativa efectiva para controlar la erosión hídrica que puede ocurrir cuando sobrevienen lluvias torrenciales después de la roturación. Las terrazas se pueden construir siguiendo o no las curvas de nivel del terreno (Ruiz, 1979), dejando su superficie con una

pequeña pendiente (menor de 6%), aunque en muchas ocasiones no es posible seguir estrictamente esta recomendación. Nuestra experiencia indica que es mejor delimitar las terrazas con bordes que puedan ser contruidos con el mismo sustrato roturado o con muros de piedra, de estar disponibles y contribuir a desempedrar el terreno.

Para evitar el deterioro de los bordes de las terrazas se recomienda establecer en ellos alguna especie vegetales que ayuden a estabilizarlo y de preferencia una especie que tenga un valor agregado, como árboles frutales, árboles forestales de rápido crecimiento que resistan las condiciones restrictivas que se generan en los bordes (por ejemplo magueyes, nopales, *etc.*) De no realizase esta obra de conservación de suelo la terraza se deteriorará rápidamente y se perderá la inversión y el trabajo empleado en su construcción.

Después de conformar las terrazas se aconseja dar un paso de rastra para fragmentar los trozos grandes de tepetate que quedan en la superficie. Por último se efectúa la nivelación de la parcela con una niveladora o algún instrumento local, como tablones, llantas o rastras de rama. De preferencia esta operación debe ser realizada cuando el tepetate roturado tenga una humedad de trabajo de campo.

CONTROL DE EROSIÓN

El material recién roturado es altamente erosionable por acción de las lluvias ya que se encuentra completamente suelto. Por ello la importancia de construir las parcelas y las obras de conservación (bordes altos, pendientes suaves o curvas de nivel, *etc.*) son fundamentales para reducir al mínimo la erosión hídrica. El escurrimiento y la pérdida de sedimentos implican la posibilidad de que se pierda fertilizante si éstos se hubiesen adicionado, adelgazamiento de la capa roturada, deterioro de la parcela y poco éxito en el establecimiento de cultivos. A este respecto es común apreciar en los Estados de México y Tlaxcala parcelas que se construyeron en el pasado por programas estatales de roturación de tepetates que se encuentran muy deterioradas y abandonadas.

El potencial de erosión hídrica de los tepetates roturados es un factor importante que debe ser considerar en la planificación de futuros programas de apoyo para la incorporación agrícola, pecuaria o forestal de estas capas endurecidas, dado que se pone en peligro toda inversión realizada. Se ha determinado que la tasa de erosión en parcelas habilitadas puede reducirse considerablemente (0.1 a $2 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) si se realizaran las obras de conservación en las mismas (Prat *et al.*, 1998).

LIMITANTES DEL SUSTRATO ROTURADO

Encostrado: La formación de suelo a partir de tepetate roturado implica un cambio drástico en la estructura física de este material. El tepetate fracturado no proporciona condiciones adecuadas para la infiltración de agua de lluvia ni para la necesaria aireación de las raíces de los cultivos, debido justamente a formación de costras en la superficie con las primeras lluvias erosivas. En ciertos casos estas costras pueden limitar o impedir la germinación de semillas como las de cebada y trigo; sin embargo, se ha observado que semillas como las de haba (*Vicia faba*), maíz (*Zea mays*), ayocote (*Phaseolus coccineus*) y veza (*Vicia sativa*) logran romperlas y emerger, aunque con dificultad. Las costras afecta el desarrollo de las plantas a lo largo de su ciclo de cultivo, así como la intensidad de los escurrimientos y el arrastre de sedimentos. Lauffer *et al.* (1997) describieron cuatro tipos de encostrado que siguen un patrón bien definido (Figura 1).

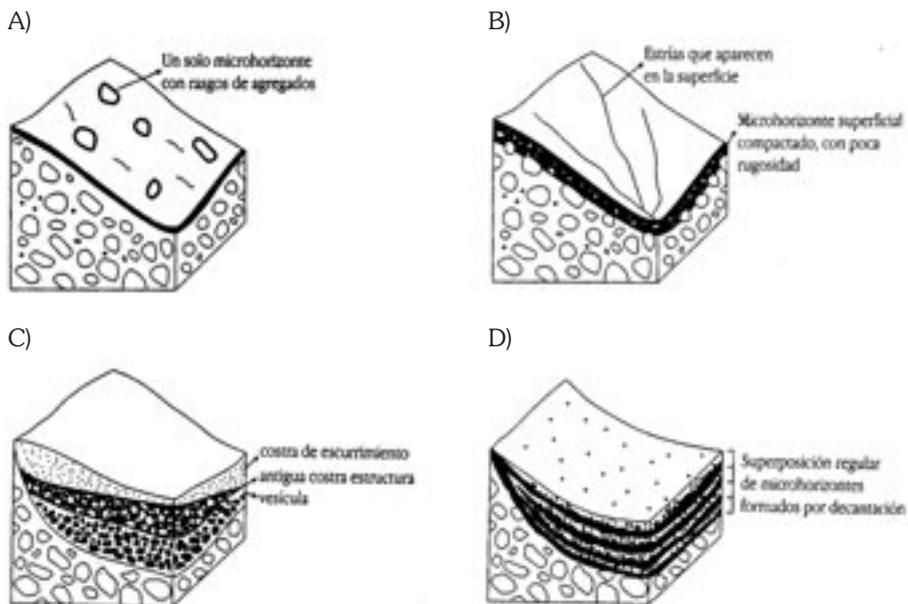


Figura 1. Formación de costras en la superficie en tepetates cultivados. A) costra estructural, B) costra de erosión, C) costra de escurrimiento y D) costra de decantación (según Casenave y Valentin, 1989; Lauffer *et al.*, 1997).

La formación de costras se inicia cuando las gotas impactan sobre la superficie del tepetate tras el laboreo; las partículas finas desagregadas tras el efecto “*splash*” forman una suspensión que impide la infiltración hídrica. Este encostramiento es más rápido en los tepetates recién habilitados, al tener poca agregación y COS (carbono orgánico del suelo).

Primero se forman costras estructurales, a las que les siguen las de erosión, las de escurrimiento y, por último, las de decantación. La energía cinética de las lluvias es el factor principal en la formación y destrucción tanto de las reorganizaciones superficiales, como los agregados en la superficie del terreno. Se ha calculado que en los tepetates 560 J m^{-2} de energía cinética acumulada generan la aparición de costras de decantación y escurrimiento que limitan que el agua se infiltre en los surcos, lo cual provoca la destrucción de surcos y mayor pérdida de suelo por escurrimiento.

La incorporación de abonos orgánicos como pajas y estiércoles puede ayudar a contrarrestar el efecto de encostrado. Los cultivos con intensa cobertura vegetal también ayudan a amortiguar la energía cinética de las gotas de lluvia. Las labores de cultivo, como las escardas, rompen las costras y favorecen la permeabilidad del sustrato; pero si el índice de cobertura vegetal es bajo las costras se formarán nuevamente. Es pertinente señalar que una escarda realizada en el tepetate cuando su contenido de humedad es elevado, no destruye completamente la costra y tampoco contribuye a la formación camellones apropiados; por el contrario, destruye la precaria protección que ofrecían los existentes, ocasionando un aumento en el escurrimiento y la carga de sedimentos. El uso de taludes entre los surcos para disminuir la velocidad de escurrimiento después de lluvias intensas, ofrece protección a la terraza contra el escurrimiento. Sin embargo, en un ciclo muy lluvioso puede ocasionar enfermedades fúngicas a cultivos de leguminosas por el exceso de humedad. Pero en año seco es una excelente alternativa.

La importancia de estudiar las agrupaciones de las partículas del sustrato en la superficie del terreno, así como su dinámica, permite entender los procesos erosivos y definir estrategias para limitarlos.

Déficit de nutrientes: Los tepetates son sustratos naturalmente pobres en nitrógeno, fósforo y carbono orgánico (Etchevers *et al.*, 1992), por lo que, la habilitación de éstos para la actividad productiva debe considerar el subsanar dichas limitaciones. Esto se logra mediante una planificación agronómicamente adecuada de la fertilización en orden a que contengan estos elementos, ya sea inorgánica u orgánica. Sin embargo, la cantidad de abonos orgánicos (estiércol o *compost*) que habría que aplicar para resolver el problema del déficit de nitrógeno y fósforo (exclusivamente con fuentes de esa naturaleza) es elevada y puede causar problemas de contaminación ambiental. Pero la incorporación de compostas, estiércoles y residuos de cosechas es necesaria para incrementar las fuentes de C en el suelo. Sin abonados orgánicos es difícil lograr que los fragmentos de tepetate evolucionen hacia agregados y formen suelo (Báez *et al.*, 2007). La formación de agregados y de la estructura en los tepetates es un proceso que se alcanza sólo a medio plazo, al igual que la acumulación de reservas orgánicas (Báez *et al.*, 2002; Covalada *et al.*, 2007); los autores recién mencionados han observado que el proceso tarda de 10 a 20 años. La calidad de los abonos orgánicos que se adicionen también es importante. Sólo cuando se incorporan compostas y estiércoles de buena calidad

(relación C/N 20:1) podría esperarse una disponibilidad inmediata de nitrógeno y fósforo (Báez *et al.*, 1997; Ferrera-Cerrato *et al.*, 1997; Navarro y Flores 1997; Álvarez *et al.*, 2000). En las etapas tempranas de la incorporación de los tepetates a la producción se prefiere el uso de fertilizantes químicos o mezclas de éstos con abonos orgánicos, que suministren rápidamente el requerimiento nutrimental de las plantas en cantidades necesarias para su crecimiento y desarrollo. En conclusión, una mezcla balanceada de ambas fuentes de nutrientes resulta ser la ideal. Los estudios realizados en los tepetates recién habilitados para la producción agrícola, indican que los restantes nutrimentos, así como otras necesidades relacionadas con el ambiente químico requerido para el crecimiento y desarrollo de las plantas, pueden ser provistos por el sustrato tepetatoso (Etchevers y Brito, 1997).

Un factor importante, estrechamente relacionado con la deficiencia de nutrimentos en los tepetates recién roturados, es la escasa presencia de microorganismos, los cuales se encuentran en poblaciones muy bajas. Álvarez-Solís *et al.* (1992) encontraron en tepetates no roturados 2.3×10^4 bacterias, 11.8×10^3 actinomicetos y 6.57×10^1 hongos. Estas poblaciones son relativamente bajas comparadas con la de suelos agrícolas, pero se ha observado que pueden aumentar después de la roturación y la adición de estiércoles. La importancia de los microorganismos radica en su actividad metabólica pues permite fijar N_2 y mineralizarlo durante la transformación de la materia orgánica a humus (Ferrera-Cerrato, 1992; Álvarez-Solís, *et al.*, 2000). La teoría permite señalar que durante los primeros años después de la habilitación, los microorganismos deben competir con las plantas por los pocos nutrimentos esenciales disponibles en el tepetate recién roturado, principalmente nitrógeno. Es por ello que la fertilización química parece ser imprescindible para asegurar una mayor disponibilidad de nitrógeno y fósforo para los cultivos.

Contenido de materia orgánica: El C es otro elemento casi ausente en los tepetates recién roturados. Éste es fundamental para aumentar la fertilidad del sustrato, mejorar sus propiedades físicas, su disponibilidad nutrimental y aumentar su productividad agrícola. El C, contenido en la hojarasca, pajas u otros residuos orgánicos, proporciona energía a los microorganismos, a la fauna y la mesofauna del suelo. Éstos a la vez, son capaces de producir humus y pegamentos orgánicos que interactúan con la fracción mineral del suelo, formando agregados estables, que son los responsables de proporcionar una estructura adecuada al tepetate roturado.

La acumulación de C en los tepetates cultivados depende de la incorporación de biomasa y abonos orgánicos a las parcelas, del manejo de cultivos y del tipo de labranza y control de la erosión. Es muy común en la zona de interés que los agricultores utilicen los esquilmos de las cosechas para la alimentación del ganado, limitando de este modo el ingreso al suelo de la principal fuente de C disponible. La incorporación de, por lo menos, parte de los residuos del cultivo a los tepetates es una práctica agronómica que contribuye a mantener o incrementar el C en los tepetates

cultivados. En la Figura 2 se muestra la acumulación de C orgánico en tepetates cultivados en nueve sistemas de cultivo.



Figura 2. Concentración de carbono orgánico en tepetates cultivados en diversos sistemas de manejo agronómico (según Báez *et al.*, 2002).

MANEJO DE LOS CULTIVOS

El tepetate puede ser productivo desde su primer año de cultivo realizando un manejo agronómico adecuado (Figura 3).

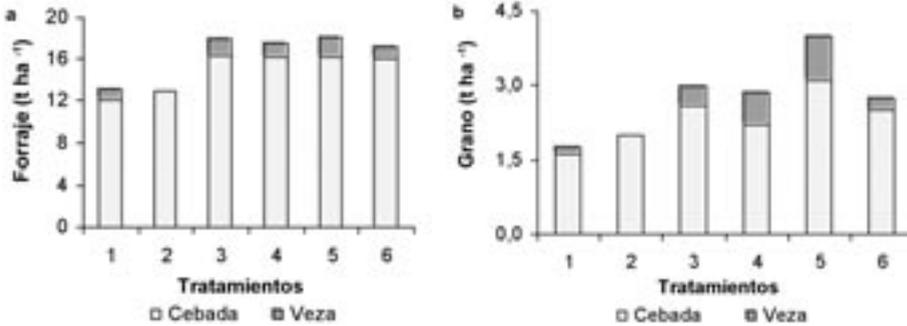


Figura 3. Proceso de la incorporación agrícola de los tepetates de los Estados de México y Tlaxcala.

Considerando las limitantes antes mencionadas, la información recabada de encuestas a agricultores y los resultados de varios experimentos de campo se puede señalar que los cereales de grano pequeño (cebada y trigo) asociados con una leguminosa forrajera (veza, *Vicia sp.*, trébol carretilla, *Medicago polymorfa*) que aporte nitrógeno al sustrato recién roturado es una buena opción para obtener rendimientos de grano semejante o superiores a lo obtenido en un suelo bajo las mismas condiciones (Márquez *et al.*, 1992; Navarro y Zebrowski, 1992; Báez, 1998).

La adición de fertilizantes químicos y orgánicos es absolutamente necesaria; la fórmula 80-60-0 kg de N, P₂O₅, K₂O por hectárea se ha demostrado que funciona bien, tomando en cuenta el rendimiento máximo alcanzable para cebada y trigo en condiciones de temporal (Galvis *et al.*, 1992). Por ejemplo, en parcelas de producción, con la asociación cebada+veza (100+33 kg de semilla ha⁻¹ respectivamente) se ha logrado producir más de 18 t ha⁻¹ de forraje fresco y más de 3 t ha⁻¹ de grano de cebada en condiciones de temporal, con un rendimiento 20% mayor a lo obtenido en el suelo de referencia (Fig. 4) (Báez *et al.*, 1997).

Especies como haba y ayocote en monocultivo han mostrado buenos resultados en tepetates cultivados por primera vez; también con veza se puede asegurar una buena producción de forraje. La incorporación de residuos de cosecha a las parcelas en los años subsecuentes al primer cultivo, es importante para mejorar paulatinamente la fertilidad del sustrato, como ya se ha señalado anteriormente. Además, representa la fuente de carbono más barata disponible para el agricultor, ya que la adición de estiércoles implica un costo adicional al proceso de producción por el transporte y la distribución e incorporación en la parcela. Por otra parte, no siempre este material se encuentra en cantidades suficientes para abastecer la demanda (Prat y Báez, 1998).



Figuras 4. Rendimiento de forraje (a) y de grano (b) de la asociación cebada y veza en un tepetate cultivado por primera vez. (1) Roturación a 60 cm + cebada-veza; (2) Roturación a -45 cm + monocultivo de cebada; (3) Roturación a -45 cm + cebada-veza + estiércol; (4) Roturación doble + cebada-veza, (5) Roturación a -45 cm + cebada-veza; y (6) Suelo + cebada-veza.

En un segundo año de cultivo el substrato habilitado es capaz de generar rendimientos aceptables de maíz, cultivo que es muy tradicional en los Estados de México y Tlaxcala. En pruebas experimentales (parcelas de 16 m²), donde se incorporaron los esquilmos de la cosecha anterior, el maíz asociado con frijol, fertilizado con 120-60-0 kg de N, P₂O₅, (sin K) por hectárea produjeron hasta 3.5 t ha⁻¹ de grano de maíz durante su segundo año de cultivo (Benítez y Navarro, 1997); rendimientos comparables con los obtenidos por los productores en suelos agrícolas. Se han realizado también pruebas en parcelas de producción (más de 1000 m²) bajo condiciones de monocultivo y maíz asociado con frijol y haba (por este orden), con una separación de 33 cm entre matas de cada especie respectivamente, tres plantas por mata y una dosis de fertilización de 70-60-0 kg. De este modo se han obtenido rendimientos de cerca de 2 t ha⁻¹ maíz en monocultivo y cerca de 2.2 t ha⁻¹ de maíz-frijol-haba en asociación (Fig. 5a). De manera global se puede apreciar la producción de grano en los sistemas asociados (maíz+haba+frijol o maíz+haba) puede ser de 30 a 50% mayor que cuando se práctica el monocultivo.

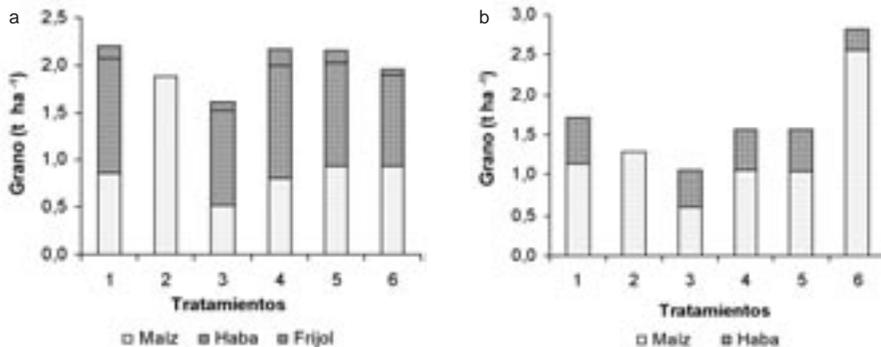


Figura 5. Rendimiento de grano de maíz, haba y frijol en un tepetate durante (a) el segundo y (b) el tercer ciclo. (1) Roturación a -60 cm + maíz-haba-frijol.; (2) Roturación a 45 cm + monocultivo de maíz; (3) Roturación a -45 cm + maíz-haba-frijol; (4) Roturación doble + maíz-haba-frijol; (5) Roturación a -45 cm + maíz-haba-frijol; y (6) Suelo + maíz-haba-frijol.

De manera general, el rendimiento de maíz puede calificarse regular y el de haba excelente. No se puede considerar realmente al cultivo de frijol como una mala opción, ya que sus bajos rendimientos tienen su explicación en el daño mecánico que sufre este cultivo durante las labores agrícolas. El establecimiento de dos leguminosas y una gramínea en una parcela asegura, por una parte, suministro de nitrógeno para el ciclo de cultivo pero, por otra, puede dificultar la operatividad de algunas labores agrícola, como de escarda principalmente. Para este caso, considerando el rendimiento total de grano, se puede apreciar que la asociación de cultivos tiene una mayor productividad y utilidad, pues el haba y frijol tienen, por lo general, un mejor precio que el maíz en el mercado.

Para un tercer ciclo de cultivo en el tepetate habilitado, en las mismas parcelas de producción, se utilizaron solamente dos especies: maíz y haba sembradas a una distancia entre matas de 40 cm. El rendimiento de maíz, en los tratamientos con asociación, aumentó de manera general 10%, respecto al ciclo anterior (Fig. 5b). Sin embargo, el rendimiento de haba, de manera global, disminuyó a menos de la mitad respecto al ciclo anterior. Esto se explica porque el cultivo fue afectado por el sombreado del maíz y el exceso de humedad.

El seguimiento agronómico de las parcelas que se han señalado, se realizó hasta el cuarto ciclo de cultivo. Los rendimientos de maíz en monocultivo fueron de 2.5 ton ha⁻¹ y la asociación de maíz-haba de 2.5 y 0.5 t ha⁻¹ respectivamente. Se ha reportado que la producción de maíz en tepetates, después de 4 años de cultivo, puede ser mayor de 3.5 t ha⁻¹ (Navarro, 1998).

LIMITANTES CLIMÁTICAS

A la altitud donde se ubican los tepetates en el paisaje (2300 a 3000 m), las condiciones climáticas son las que influyen mayormente sobre la producción, ya que las propias limitantes físicas, químicas y biológicas del sustrato cultivado pueden ser controladas. El volumen y distribución de las lluvias a lo largo de un ciclo de cultivo son, generalmente, muy irregulares; la presencia ocasional de granizadas, de líneas de convergencia que ocasionan vientos fuertes y acame en los cultivos y los frentes fríos que ocasionan heladas tempranas o tardías son los principales factores climáticos que influyen sobre la producción agrícola de los Estados de México y Tlaxcala. Su efecto, en algún momento determinado, puede tener una mayor influencia sobre la producción agrícola que las mismas limitantes naturales de los tepetates que se han mencionado anteriormente. Los rendimientos máximos alcanzables para cultivos como el maíz dependen en parte de las fechas de siembra; sin embargo, éstas son estrictamente determinadas por el inicio de la temporada de lluvias. La sequía estival, el exceso de lluvia, las temperaturas extremas son variables que no se pueden controlar.

CONCLUSIONES

Aún con algunos factores ambientales adversos imperantes durante los ciclos de cultivo que propician ciertas limitantes para la producción ha sido posible reunir un conjunto de elementos de manejo suficientes para definir condiciones de producción óptimas para la incorporación de los tepetates a la agricultura. El control de la erosión, la adecuada selección

cultivos y su rotación, la asociación de gramíneas con leguminosas, la adición de abonos químicos y orgánicos y las técnicas de captación de agua de lluvia son indispensables para obtener buenos resultados en los primeros años de cultivo en siembras de temporal. Los sistemas asociados de gramíneas con leguminosas son mucho más productivos que los sembrados en monocultivo. Estos trabajos mostraron que no es necesario roturar a una profundidad mayor de -45 cm. Aunque una mayor profundidad de roturación proporcionaría un mayor reservorio de agua, y la precipitación y la evapotranspiración históricas señalan que difícilmente habría suficiente agua para rellenar este reservorio. Además, la intensidad y distribución de lluvias en el tiempo resultan en formación rápida de costras en la superficie del tepetate habilitado, lo que limita la infiltración, dificultando que éste se llene. Roturar a -60 cm de profundidad es 30% más caro que a -45 cm y no se justifica.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICAS

- Arias R., H. M. 1992. Dinámica Rehabilitación de tepetates: una alternativa para la producción agropecuaria y forestal. *Terra* 10 (Número especial), 309-317.
- Álvarez-Solís, J. D., R. Ferrera-Cerrato y C. Zebrowski. 1992. Análisis de la microflora asociada al manejo agroecológico en la recuperación de tepetates. *Terra* 10 (Número especial), 419-424.
- Álvarez-Solís, J. D., R. Ferrera-Cerrato y J. D. Etchevers. 2000. Actividad microbiana tepetates con incorporación de residuos orgánicos. *Agrociencia*, 34: 523-532.
- Báez, A. 1998. Capacidad productiva de un tepetate recién roturado y terraceado, cultivado con cebada y veza en condiciones de temporal. Tesis de licenciatura de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán. Universidad Nacional Autónoma de México. pp.: 36-56.
- Báez, A., E. Ascencio, C. Prat y A. Márquez, 1997. Análisis del comportamiento de cultivos en tepetate t3 incorporado a la agricultura de temporal, Texcoco, México, pp. 296-310. En: Zebrowski, C., P. Quantin y G. Trujillo, (eds.). *Tercer Simposio Internacional: Suelos Volcánicos y Endurecidos*. ORSTOM, Quito (Ecuador).
- Báez, A., J. D. Etchevers, C. Hidalgo, C. Prat. 2007. Formation of aggregates and carbon sequestration in ameliorated tepetates in the Rio Texcoco Basin. Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 24: en prensa
- Báez, A., J. D. Etchevers, C. Hidalgo M., C. Prat, V. Ordaz C. y R. Núñez E. 2002. C orgánico y P-Olsen en tepetates cultivados de México. *Agrociencia*, 36: 643-653.
- Benítez, D. y H. Navarro. 1997. Rendimiento de maíz-frijol en un tepetate de segundo año de rehabilitación agrícola, pp. 279-286. En: C. Zebrowski, P. Quantin, y G. Trujillo (eds.), *Tercer Simposio Internacional: Suelos Volcánicos y Endurecidos*. ORSTOM, Quito (Ecuador).

- Casenave, A. y C. Valentín. 1989. Les états de sure face de la zone saluélienne: Influence sur l'infiltration. *Collection didactiques*. ORSTOM, París. 230 pp.
- Covaleda, S., S. Pajares, M Haulon, J. F. Gallardo, J. D. Etchevers, G. Werner, S. Marinari y A. Báez 2007. Secuestro de C en tepetates rehabilitados para el uso agrícola en el Estado de Tlaxcala (México). En el presente volumen.
- Etchevers, J. D. y H. Brito. 1997. Levantamiento nutrimental de los tepetates de México y Tlaxcala, pp. 202-212. En: C. Zebrowski, P Quantin y G. Trujillo, (eds.). *Tercer Simposio Internacional: Suelos Volcánicos y Endurecidos*. ORSTOM, Quito (Ecuador).
- Etchevers, J. D., R. M. López, C. Zebrowsky y D. Peña. 1992. Fertilidad de los tepetates de la vertiente occidental de la Sierra Nevada (México). *Terra 10* (Número especial), 379-384.
- Etchevers, J. D., C. Hidalgo, C. Prat y P. Quantin. 2006. Tepetates of Mexico. En: *Encyclopedia of soil science*. Marcel Dekker, Nueva York, pp. 1745-1748.
- Ferrera-Cerrato, R. 1992. Papel de los microorganismos en la recuperación de suelos marginales. *Terra 10* (Número especial), 408-414.
- Ferrera-Cerrato, R., A. Ortiz, J. Delgadillo y S. Santamaría. 1997. Uso de la materia orgánica en la recuperación de tepetates y su influencia en los microorganismos, pp. 225-237. En: C. Zebrowski, P Quantin y G. Trujillo (eds.). *Tercer simposio Internacional: Suelos Volcánicos y Endurecidos*. ORSTOM. Quito, Ecuador.
- Galvis S., A., J. D. Etchevers, J Rodríguez S., L. Aceves N. y C. Ortiz S. 1992. Validación de normas de fertilización generadas por un modelo simplificado. *Agrociencia*, serie Agua-Suelo-Clima 2 (4): 19-31.
- Hernández X., E. 1987. Etnobotánica de Tlaxcala, pp. 1-8. En: F. Ruiz (ed.) *Uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural*. Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco (México).
- Hidalgo Moreno, C. 1996. Étude d'horizons indurés à comportement de fragipan, appelés *tepetates*, dans le sol volcaniques de la vallée de Mexique. *Contribution à la connaissance de leurs caracteres et de leur formation*. TDM 146. ORSTOM editions, París.
- Lauffer, M., Y. Leroux, C. Prat y J. L. Janeau. 1997. Organización superficial de los tepetates cultivados, Texcoco (México), pp. 443-456. En: C. Zebrowski, P Quantin, y G. Trujillo (eds.), *Tercer Simposio Internacional: Suelos Volcánicos y Endurecidos*. ORSTOM, Quito (Ecuador).
- Márquez R., A., H. Navarro G., y C. Zebrowski. 1992. Alternativas agronómicas para la recuperación de tepetates. *Terra 10* (Número especial), 465-473.
- Navarro G., H. y C. Zebrowski. 1992. Análisis agronómico comparativo en tepetates. *Terra 10* (Número especial), 454-459.
- Navarro G., H. y D. Flores S. 1997. Manejo agronómico diferencial de la asociación maíz-haba en tepetate de quinto año de uso agrícola, pp. 287-295. En: C. Zebrowski, P Quantin y G. Trujillo (eds.), *Tercer Simposio Internacional: Suelos Volcánicos y Endurecidos*. ORSTOM, Quito (Ecuador).

- Navarro G., H. 1998. Potencialidades agronómicas y sistemas rotacionales para la recuperación de los suelos volcánicos endurecidos, pp. 37-59. En: G. Navarro, H. Poupon y M. A. Pérez. (eds.), *Aptitud productiva en suelos volcánicos endurecidos (tepetates)*. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.
- Ortiz S., C. A. y M. C. Gutiérrez-Castorena. 1999. Evaluación taxonómica de sistemas locales de clasificación de tierras. *Terra Latinoamericana*, 17: 277-286.
- Peña, D. y C. Zebrowski, 1992. Los suelos y tepetates de la vertiente occidental de la Sierra Nevada. *Terra* 10 (Número especial), 151-155.
- Peña, D. y C. Zebrowski, 1993. Estudio de los suelos volcánicos endurecidos de las cuencas de México y Tlaxcala. *Informe de Mapa Morfopedológico de la Vertiente Occidental de la Sierra Nevada*. Anexo 2: Descripción de perfiles. Contrato CCE/ORSTOM No. 0212. pp: 1-16.
- Prat, C. y A. Báez. 1998. Condiciones de habilitación agrícola de una toba volcánica endurecida (*tepetate*) en México. En: *16 Congreso Mundial de la Ciencia del Suelo*. Registro científico no. 2547, Simposio no. 38 (CD-ROM). Montpellier, Francia.
- Prat, C., A. Báez, E. Ascencio y A. Márquez 1998. Erosión de una toba volcánica endurecida en proceso de rehabilitación, pp. 89-98. En: G. Navarro, H. Poupon y M. A. Pérez (eds.), *Aptitud productiva en suelos volcánicos endurecidos (tepetates)*. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.
- Ruíz F., J. F. 1979. Evaluación de cinco tipos de terrazas en suelos de ladera de la cuenca del río Texcoco. Tesis de Maestría en Ciencia del Colegio de Postgraduados. Montecillo (México). pp: 8-21.
- Werner, G. 1992. Suelos volcánicos endurecidos (tepetates) en el estado de Tlaxcala: Distribución, rehabilitación, manejo y conservación. *Terra* 10 (Número especial), 318-331.
- Williams, B. J. 1992. "Tepetate" in 16th century and contemporary folk terminology valley of México. *Terra* 10 (Número especial), 483-493.

Juan F. GALLARDO LANCHO (Ed.)

LA CAPTURA DE CARBONO EN ECOSISTEMAS TERRESTRES IBEROAMERICANOS

RED POCAIBA

**Red Iberoamericana
de Física y Química Ambiental**

<www.sifyqa.org.es>

**SOCIEDAD IBEROAMERICANA DE FÍSICA Y QUÍMICA AMBIENTAL
SALAMANCA (ESPAÑA)**

COORDINADOR

Juan F. GALLARDO LANCHO (Presidente SiFyQA).

REVISORES

Han actuado como revisores (por pares) anónimos de los artículos publicados los siguientes científicos, a los que se hace constancia de agradecimiento: Adriana ABRIL, Julio CAMPO, Carlos E. P. CERRI, Jorge D. ETCHEVERS, Juan A. GALANTINI, Juan F. GALLARDO, Felipe GARCIA-OLIVA, A. Afonso MARTINS, Agustín MERINO, Raúl PONCE, Christina SIEBE y Belén TURRION.

Esta obra es producto de la Red POCAIBA, integrada dentro de la **Red Rifyqa** (Red Iberoamericana de Física y Química Ambiental), y del apoyo de la S.E.U.I. (Ministerio de Educación y Ciencia español).

© **SiFyQA** <www.sifyqa.org.es>

RESERVADOS TODOS LOS DERECHOS.
PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL DE ESTA
OBRA POR CUALQUIER PROCEDIMIENTO, INCLUIDA
LA FOTOCOPIA, SIN PERMISO ESCRITO DEL EDITOR.

I.S.B.N.: 978-84-611-9622-7

Depósito legal: S. 1821-2007

GRÁFICAS CERVANTES, S.A.
Ronda de Sancti-Spíritus, 9-11
37001 SALAMANCA (España)

Impreso en España
Printed in Spain

