

Caracterización mineralógica de los tepetates tipo fragipán del valle de México

Claudia HIDALGO, Paul QUANTIN, Françoise ELSASS

Abstract

The tepetates of Mexico Highlands are indurated horizons with fragipan properties. Tepetates appear among pyroclastic deposits on the western slopes of Sierra Nevada. These materials are derived from three recent and successive pyroclastic deposits (T1, T2, T3). A soil profile located near Texcoco, Mexico, including tepetate layers was studied. Mineralogical and microscopical features of this profile were studied using a series of methods. This report the main results of the study. Tepetates were characterized by several features: first, the nature of their parent material; second, a close matrix microstructure and third, their colloidal fraction. The latter is conformed mainly by laminated 1:1 to 2:1 mixed layer minerals made of flaky layers. These features can explain the fragipan properties of tepetates and most of their mechanical behaviour.

Keywords: Tepetate - Mexico - Mineralogy

INTRODUCCIÓN

Los «tepetates tipo fragipán» son horizontes duros de origen volcánico que reciben esta denominación por presentar características similares a las de los fragipanes: son duros cuando están secos pero friables y/o plásticos después de humedecerlos (Peña y Zebrowski, 1992). Estos tepetates cubren una parte considerable del piedemonte de la Sierra Nevada en el altiplano central mexicano, lo que ha provocado graves problemas de manejo agrícola y la esterilidad de estas áreas. La recuperación de las zonas con tepetates (entre otros los de tipo fragipán) en México condujo al desarrollo de un programa de cooperación (CEE/ORSTOM N° TS2-212-C) denominado «Estudio de los suelos volcánicos endurecidos (tepetates) de los valles de México y Tlaxcala (México)», orientado, por un lado, hacia el conocimiento de la naturaleza, del origen y de la formación de los tepetates, y por otro, a su rehabilitación agrícola y su conservación. El presente trabajo se inscribe en el marco general de ese programa y pretende aportar elementos que contribuyan al estudio de estos horizontes duros.

La caracterización mineralógica de los tepetates tipo fragipán se inició hace algunos años con los trabajos realizados por Hidalgo (1991) y Quantin *et al.* (1992), investigaciones dirigidas principalmente al conocimiento de la naturaleza del material de origen. Posteriormente, se estudiaron en detalle los minerales primarios y las arcillas (Hidalgo *et al.*, 1992, 1993, 1994, 1995). Dados los numerosos resultados obtenidos de esos

trabajos y el carácter de este III Simposio Internacional sobre suelos endurecidos y estériles, se consideró que lo más conveniente sería presentar un resumen de los aspectos más relevantes, discutirlos y mostrar su contribución al conocimiento de los tepetates tipo fragipán del valle de México. Se presentarán también algunos de los resultados correspondientes al estudio microestructural que complementó este trabajo mineralógico.

PRESENTACIÓN DEL MATERIAL DE ESTUDIO

La presencia de los tepetates fragipán está limitada por factores topográficos y climáticos. Aparecen solamente en el piedemonte a altitudes comprendidas entre 2.400 y 2.800 m.s.n.m., en clima subhúmedo y en un régimen ústico-isomésico que se caracteriza por una estación seca que dura de 5 a 6 meses (Dubroëucq *et al.*, 1991). Para el estudio, se seleccionó un perfil de referencia (figura 1) ubicado en el piedemonte de la Sierra Nevada, cerca del poblado de San Miguel Tlaixpan. En el perfil se localizaron tres niveles de tepetates (t2a, t2b y t3), que se encuentran intercalados entre otros horizontes de suelo, constituyendo, en conjunto, cuatro series de depósitos piroclásticos denominados T1, T2, T3 y T4 (Hidalgo, 1995).

Las series de material piroclástico presentan diferentes características. La serie T4 tiene un espesor variable, corresponde a emisiones volcánicas de más de 21.000 años (Miehlich, 1991) y se identifica en el terreno por su color pardo ligeramente rojizo. Las siguientes dos series, también de espesor variable, son más recientes: T3 de 21.000 a 12.600 años B.P. y T2 de 12.600 a 8.500 años B.P. Esta última se identifica fácilmente en el terreno por su color claro (casi blanco o gris claro). La serie T1 corresponde a materiales volcánicos acarreados por el viento y su edad está comprendida entre 8.500 y 3.000 años B.P. Está recubierta por depósitos areno-limosos de tipo eólico-coluvial que forman el suelo actual, en el que se encuentran frecuentemente fragmentos de cerámica, obsidiana y cenizas volcánicas recientes.

Se considera que los tres niveles de tepetate estudiados (t2a, t2b y t3) son tobas de material piroclástico con un nivel de alteración intermedio (Bertaux y Quantin, 1994). Los tepetates t2a y t2b son horizontes duros, de color claro casi blanco (t2a) o grisáceo (t2b) que siguen la pendiente natural del terreno aflorando frecuentemente a la superficie como resultado de la erosión. Estos dos tepetates tienen una estructura prismática bien desarrollada en su base y bastante fragmentada hacia la parte superior en donde se torna poliédrica. El tercer nivel de tepetate (t3) se caracteriza en el terreno por su color pardo-rojizo; su textura es limo-arcillosa, presenta una estructura prismática bien desarrollada y en las caras de los prismas se observan manchas oscuras de color pardo o negro que corresponden a revestimientos o nódulos de óxido de hierro y/o manganeso.

TÉCNICAS Y MÉTODOS DE ANÁLISIS

Con el objeto de determinar algunas características de tipo mineralógico y microestructural que nos permitieran caracterizar mejor a los tepetates fragipán, se utilizaron los siguientes métodos y técnicas:

- observaciones y estudios en microscopio a diferentes niveles: microscopio óptico (MO), electrónico de barrido (MEB), electrónico de transmisión (MET), microanálisis por espectrómetro de selección de energía (EDS) y microdifracción electrónica;
- técnicas analíticas: análisis químico total por el método «triácido» (Betremieux, 1948);
- técnicas mineralógicas: análisis por difracción de rayos X, análisis térmico diferencial (ATD) y gravimétrico (ATG), espectroscopía infrarroja (IR).

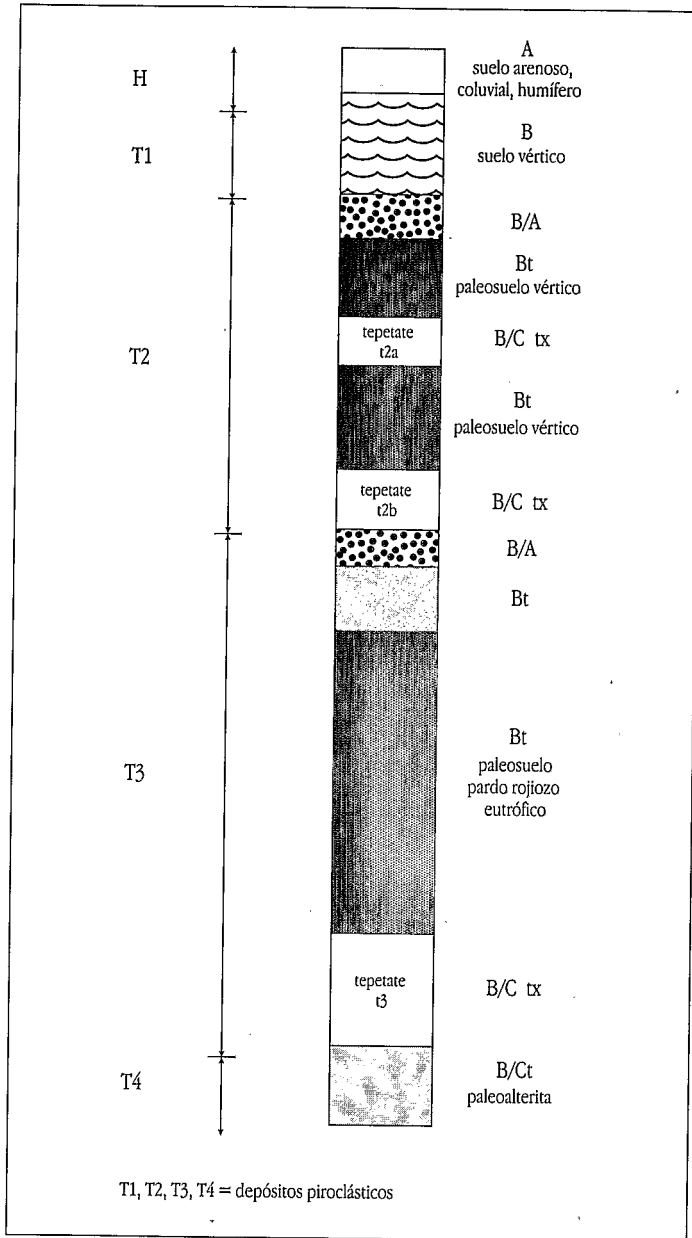


Figura 1 - Perfil de estudio

Se realizó también una estimación semi-cuantitativa de los minerales primarios presentes en la fracción gruesa (50 - 500 μm) por medio de técnicas petrográficas.

RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL DE ORIGEN

Las observaciones en microscopio óptico y electrónico de *frottis* y de láminas delgadas mostraron que el material original de los tepetates está constituido principalmente de fenocristales de cuarzo, plagioclasas, feldespatos potásicos, anfíboles y piroxenos; de fragmentos de vidrio volcánico; de cristobalita, de fitolitos y solamente en los horizontes de la serie T2b, de diatomeas. Los anteriores componentes minerales se presentaron con diferentes grados de alteración y algunos casi inalterados.

La determinación de los minerales primarios que componen la fracción gruesa del suelo (50 - 500 μm) se realizó mediante técnicas petrográficas (Hidalgo, 1995) y observaciones en microscopio óptico y electrónico de barrido en *frottis* y en láminas delgadas, complementándose con el análisis por difracción de rayos X. Por otro lado, la naturaleza del material de origen se determinó mediante análisis químico, empleando para ello la técnica del «triácido». Las observaciones y estudios en microscopía óptica y electrónica de los minerales primarios, así como los resultados del análisis químico «triácido», corroboran la naturaleza de las cuatro series de material piroclástico (T1, T2, T3 y T4) que originan los tepetates fragipán. La serie T4, cerca de la base del perfil, es la más antigua (21.000 a 35.000 años B.P.) y comprende los horizontes h-9 a h-11. La serie T3, de menos de 21.000 años B.P., comprende los horizontes h-6 a h-8. Ambas presentan porcentajes importantes de hornblenda (90 %) y poca hiperstena (< 10 %). Su composición es semejante a la de las riolitas alcalinas. Las otras dos series, cerca de la superficie —serie T2 que comprende los horizontes h-5 a h-4, y serie T1 los horizontes h-3 a h-2— son las más recientes, presentan una composición mineralógica con porcentajes importantes de hornblenda (50 - 60 %) e hiperstena (30 - 40 %) muy similar a la de las riocacitas. De estas dos series, la T2 es la más básica y se caracteriza también por presentar porcentajes de augita entre 10 y 12. Una excepción en estas series constituye el horizonte h-3 cuya composición mineralógica es semejante a la de las series ricas en hornblenda (79 %) aunque tiene un porcentaje de hiperstena relativamente considerable (17 %). Los porcentajes de residuo obtenidos después de la disolución de los minerales secundarios mediante el reactivo «triácido» caracterizan el grado de alteración del material de origen. El horizonte h-1, con una tasa de residuo del 74 %, corresponde a los depósitos más recientes, en tanto que los horizontes de tepetate h-5, h-7 y h-11 presentan tasas de residuo (53 %, 44 % y 52 % respectivamente) mayores a las de los horizontes de suelo (h-4, 44 %; h-6, 30 %; h-10, 45 %) sobreyacentes a la misma serie, que presentan el menor grado de alteración.

RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DE LOS MINERALES SECUNDARIOS

Los difractogramas de rayos X de las preparaciones orientadas de la fracción arcilla fina (< 0,5 μm) de los horizontes de suelo presentan un pico a 4,45 Å de mayor tamaño que los que aparecen a 7,56 Å y 3,56 Å, lo que revela que las arcillas de los horizontes de suelo presentan problemas para su orientación. Después de la saturación con etilén glicol (EG), se observa el aspecto «irracional» de las reflexiones principal (7,56 Å) y secundaria (3,56 Å), el mismo que se manifiesta por el desplazamiento de estas reflexiones, la primera de 7,56 Å \rightarrow 7,49 Å y la segunda de 3,56 Å \rightarrow 3,62 Å. Este comportamiento y la aparición de una pequeña curva cerca de 10 Å indican la presencia de minerales arcillosos interestratificados de tipo 1:1/2:1 en los horizontes de suelo. Por el contrario, los difractogramas de las preparaciones orientadas de la fracción arcilla fina (< 0,5 μm) de los tepetates muestran la atenuación bastante importante del pico a 4,45 Å respecto al de 7,56 Å y 3,56 Å, lo que indica que en el caso de los tepetates las arcillas se orientan bien.

La saturación con etilén glicol (EG) muestra que las reflexiones principal (7,56 Å) y secundaria (3,56 Å) presentan también un aspecto «irracional», así como una ligera curva cerca de 10 Å, confirmando con ello la presencia de interestratificados de tipo 1:1/2:1, como en el caso de los horizontes de suelo. Un caso especial corresponde al tepetate t2b, en el que la preparación orientada (fracción < 0,5 µm) presenta una banda importante entre 19 Å y 14 Å, la misma que se desplaza cerca de 20 Å como resultado de la saturación con el EG pero queda bien desarrollada entre 13 Å y 10 Å después de la calcinación a 500 °C. Este comportamiento revela que en este tepetate predomina una arcilla de tipo 2:1.

Las observaciones en microscopio electrónico de transmisión (MET) muestran que tanto en los horizontes de suelo como en los de tepetate, las arcillas son de diferentes formas: plaquetas (hojuelas o láminas) subangulosas y/o ovoides, en ocasiones con bordes parcialmente plegados. También hay arcillas enrolladas, de forma esférica, en ocasiones tubulares, o bien de formas irregulares a veces parecidas a madejas de hilo y a espigas de maíz.

A fin de completar la caracterización de las arcillas identificadas, se procedió a determinar su composición química por microanálisis (EDS). Las formas enrolladas son menos aluminosas, ligeramente más ricas en sílice, magnesio y potasio que las arcillas en forma de plaquetas (ovoides, subangulosas), lo que indica que las primeras presentan un componente 2:1 que, de acuerdo a los considerables porcentajes de magnesio y aluminio, podría ser de tipo beidellita. Por el contrario, las formas de plaquetas presentan una composición química que se asemeja a los minerales arcillosos de tipo 1:1. Por último, los análisis térmico diferencial (ATD) y gravimétrico (ATG) confirman la presencia de arcillas 2:1 en los horizontes de suelo y de tepetate. Sin embargo el componente 2:1 es más importante en los horizontes de tepetate que en los horizontes de suelo de la misma serie, lo que podría considerarse como una característica distintiva de los tepetates fragipán.

RESULTADOS DEL ESTUDIO DE LAS FORMAS Y LOCALIZACIÓN DE LA SÍLICE PRESENTE

Se identificaron dos tipos de formas de sílice: cristalinas y no cristalinas. Las primeras fueron el cuarzo y la cristobalita y las segundas los fitolitos, los vidrios volcánicos, el ópalo-A y los geles de sílice. La cristobalita se identificó claramente en la fracción fina (< 0,5 µm), una vez obtenido el difractograma de rayos X del residuo resultante del ataque ácido («triácido») de esta fracción. Se presenta un pico bien desarrollado a 4,07 Å, característico de este mineral. La presencia de fitolitos y de vidrios volcánicos se manifestó claramente a partir de las observaciones de *frottis* de la tierra fina (500 - 50 µm). Ambos presentan diferentes tamaños. En el caso de los fitolitos, pueden llegar a medir hasta 200 µm y en el de los vidrios volcánicos hasta 400 µm; los dos están igualmente presentes tanto en los horizontes de suelo como en los de tepetate. El microanálisis EDS permitió obtener su composición química: los fitolitos presentan contenidos de ≈ 93 % de SiO₂ y los vidrios volcánicos una naturaleza alcalino-sódica.

En las formas de sílice no cristalinas, se identificó la presencia de ópalo-A, que aparece frecuentemente formando microzonas de algunos micrometros cuadrados de superficie, ricas en sílice y que se distribuyen al azar por toda la microestructura (matriz y rasgos pedológicos). Las observaciones en detalle de las microzonas muestran que están constituidas por un conjunto de laminillas más pequeñas que forman estructuras que denominamos «nido de abeja». La naturaleza del diagrama de microdifracción de un conjunto de estas laminillas, semejante al de un producto no cristalino, y su composición química (98 % SiO₂ y trazas de aluminio) confirman la presencia de ópalo-A. La última forma

de sílice identificada fueron los geles que aparecieron claramente después de observar en MET algunos cortes ultra-delgados de un relleno de naturaleza aparentemente arcillosa en el tepetate t3. Su composición química, obtenida por microanálisis EDX, muestra su naturaleza silícica y alcalino-sódica (76 - 63 % SiO₂, 13 - 4 % K₂O, ≈ 3 % Na₂O).

RESULTADOS DEL ESTUDIO MICROESTRUCTURAL

Los resultados de las observaciones en microscopio óptico (MO) y electrónico de barrido (MEB) de secciones delgadas de diversos horizontes de suelos y de tepetates muestran rasgos pedológicos que permiten diferenciar los horizontes de suelo de los de tepetate. La característica distintiva de los tepetates es su matriz compacta heredada de la toba, el material de origen, un esqueleto conformado por fenocristales, microlitos y trozos de vidrios volcánicos inalterados y angulosos que presentan una distribución porfírica. Los tepetates t2a, t2b y t3 pueden, a su vez, diferenciarse entre sí por el grado de evolución de su microestructura: t3 > t2a > t2b. Las observaciones en microscopio óptico muestran una incipiente actividad biológica, en especial del tepetate t2b, lo que confirma que se trata de un horizonte de alteración mineral (horizonte «C»). El tepetate t3 presenta frecuentemente en su matriz revestimientos y rellenos de color amarillo claro que, de acuerdo a sus características podrían ser de material arcilloso. El microanálisis (EDS) confirmó que, efectivamente, una parte importante de estos rasgos edafológicos se compone de arcillas que se caracterizan por tener bajos porcentajes de hierro, y relaciones moleculares que varían de 4 a 5 para «ki» y de 3 a 4 para «kr». En t3, ciertas zonas de la masa basal y algunos revestimientos alrededor de los poros y canales presentan porcentajes elevados de SiO₂, que en ocasiones pueden alcanzar hasta 78 % SiO₂ y que, evidentemente, no pueden corresponder a filosilicatos.

DISCUSIÓN GENERAL Y CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos permitieron, por una parte, plantear una serie de características mineralógicas y microestructurales distintivas de los tepetates tipo fragipán, y por otra, avanzar en el conocimiento del comportamiento de estos horizontes duros.

Características principales de los tepetates tipo fragipán

La naturaleza del material de origen

Los tepetates tipo fragipán están constituidos por material piroclástico de composición similar a la de las riolitas alcalinas y sódicas. Son series que tienen más de 12.000 años de edad. Este material está poco alterado por lo que presenta cantidades considerables de minerales primarios residuales. Los más abundantes son la hornblenda y la hiperstena; la proporción de ambos, la presencia de augita en ciertos horizontes y la edad de las series piroclásticas definieron bien las cuatro series de material piroclástico identificadas en el terreno (T1, T2, T3 y T4) que presentan un carácter más básico cuanto más recientes son.

El carácter compacto de la matriz

Los tepetates tipo fragipán se caracterizan por una matriz consolidada lo que confirma que este horizonte duro corresponde en realidad a un estado intermedio en la alteración de una toba (Bertaux y Quantin, 1994). Otras características de la matriz heredadas de la toba confirman su origen: un esqueleto compuesto de fenocristales, de microlitos y pedazos de vidrio inalterados y angulosos y la distribución «porfírica» en el seno de la matriz de los mismos; la

distribución del tamaño de las partículas en donde predominan los limos finos y la arcilla, lo cual es característico del producto de la alteración de cenizas volcánicas (Quantin *et al.*, 1992). La única incógnita que subsiste a este respecto se refiere al origen de la toba y del tepetate: ¿proviene los dos de un material homogéneo o de dos depósitos sucesivos del mismo episodio eruptivo? Esto podría constituir un tema de futuros estudios.

La presencia de minerales arcillosos interestratificados de tipo 1:1/2:1 con predominio del componente 2:1 y estructurados en «plaquetas orientadas»

Este es un criterio discriminante respecto a los horizontes de suelo de la misma serie de depósitos piroclásticos. Implica un arreglo de las partículas de arcilla «cara a cara» y por lo tanto una fuerte cohesión de la matriz. Este ordenamiento de las arcillas podría haber sido inducido por la textura microlaminar de la matriz de la toba de la que provienen ya que el plasma arcilloso se originó en la alteración de los vidrios volcánicos y de los minerales primarios más pequeños y fácilmente alterables.

Contribución al estudio del comportamiento del tepetate tipo fragipán

La estructura compacta de la matriz del tepetate fragipán ha sido modificada por una serie de procesos, lo cual explica en gran medida algunas de sus propiedades y parte de su comportamiento.

La alteración de los vidrios y minerales finos produjo dos efectos opuestos: por una parte, disminuyó la masa basal y desarrolló una microporosidad inframicroscópica ($< 1 \mu\text{m}$); por otra, reforzó la cohesión de la matriz por la formación de un plasma (parte fina de la matriz) constituido de minerales arcillosos interestratificados 1:1/2:1 con predominio de arcillas 2:1, óxidos e hidróxidos de Fe y Mn y geles de sílice y microzonas de ópalo-A. La naturaleza (composición química y mineralógica) de la parte fina de la matriz explica la capacidad importante que presenta el tepetate fragipán de aumentar y reducir su volumen (hincharse y contraerse) —del 5 al 15 %— y el carácter reversible de su comportamiento, duro en estado seco y frágil en húmedo, pudiéndose también desagregar en agua. Esto muestra claramente que en el caso de los tepetates fragipán no existe un cementante estable como en los duripanes y los horizontes petrocálcicos. Por lo tanto, la redistribución y acumulación de los productos de alteración (minerales arcillosos, óxidos e hidróxidos de Fe y Mn, geles de sílice) en la matriz del tepetate así como en los poros, fisuras y canales, ha contribuido ciertamente a la consolidación del tepetate fragipán. Sin embargo, no se trata de una cementación ni de un factor que determine su carácter compacto.

El bajo grado de alteración del material de origen, una estructura continua y compacta de la matriz (porosidad total $< 40 \%$), un reducido volumen de macroporos ($< 40 \%$), y la oclusión de canales, fisuras y poros por productos de iluviación, explican que la densidad aparente del tepetate fragipán sea ligeramente superior a la del horizonte de suelo sobreyacente, así como la conductividad hidráulica lenta (0,3 a 0,5 mm/h) y los valores reducidos ($< 9 \%$) de la macroporosidad (poros $> 10 \mu\text{m}$) la cual puede ser en ocasiones casi nula.

Los tepetates tipo fragipán se caracterizan por una estructura prismática y/o poliédrica, resultante de los procesos de compresión y expansión provocados por la alternancia de las estaciones seca y húmeda.

Referencias bibliográficas

- BERTAUX, J.; QUANTIN, P., 1994: Relation géométrique et variations minéralogiques des différents termes d'une séquence d'altération de tufs pyroclastiques de la région de Texcoco (México), dans *Transactions of the 15th International Congress of Soil Science*, Vol. 5, Acapulco, México, p. 232-233.
- BETREMIEUX, R., 1948: Méthodes aux réactifs triacides, dans *Traité pratique de chimie végétale*, Tome II, Éditions Brumel, p. 87-102.
- DUBREUCQ, D.; QUANTIN, P.; ZEBROWSKI, C., 1989: Los tepetates de origen volcánico en México. Esquema preliminar de clasificación, en *Terra*, Vol. 7, 1, p. 3-12.
- HIDALGO, C., 1991: *Contribution à l'étude des sols volcaniques indurés (tepetates) de la région de México (cimentation, induration)*, D.E.A. de Pédologie, Université de Nancy I-ORSTOM, France, 57 p.
- HIDALGO, C., 1995: *Étude d'horizons indurés à comportement de fragipan, appelés « tepetates », dans les sols volcaniques de la vallée de Mexico*, Thèse de Doctorat en Pédologie, Université Henri Poincaré, U.F.R. Sciences & Techniques de la Matière et des Procédés, Nancy, France, 215 p.
- HIDALGO, C., ELSASS F., QUANTIN, P., 1994: *Étude de la microstructure d'un horizon volcanique induré (tepetate) de la vallée de Mexico par microscopie électronique à transmission*, Journées de Pédologie, ORSTOM Bondy, France.
- HIDALGO, C., QUANTIN, P., ZEBROWSKI, C., 1992: La cementación de los tepetates: estudio de la silicificación, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM/Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 192-201.
- HIDALGO, C.; BERTAUX, J.; QUANTIN, P., 1993: Form of Silica in Indurated Volcanic Soils of the Mexico Valley, in *Proceedings of the 10th International Clay Conference*, Adelaide, p. 487-493.
- MIEHLICH, G., 1991: *Chronosequences of Volcanic Ash Soils*, Hamburger Bodenkundl. Arbeiten, 15, 207 p.
- PEÑA, D.; ZEBROWSKI, C., 1992: *Estudio de los suelos volcánicos endurecidos (tepetates) de las cuencas de México y Tlaxcala (México). Informe del mapa morfopedológico de la vertiente occidental de la Sierra Nevada*, anexo al informe final, Contrato CCE-ORSTOM N° TS2-0212, 101 p.
- QUANTIN, P.; ZEBROWSKI, P.; DELAUNE, M.; HIDALGO, C., 1992: El material original de los tepetates t2 y t3 de la región de Texcoco (México): ¿loess o tepetate?, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 178-182.