

Aptitud Productiva en Suelos Volcánicos Endurecidos (*tepetates*)

**ORIENTACION Y PROBLEMATICA CIENTIFICA  
PARA LA REGENERACION Y CONSERVACION  
DE SUELOS VOLCANICOS ENDURECIDOS Y ESTERILES**

**Paul Quantin**

Hermilio Navarro, Henri Poupon y Ma. Antonia Pérez

**ORIENTACION Y PROBLEMÁTICA CIENTÍFICA PARA LA REGENERACION Y  
CONSERVACION DE SUELOS VOLCANICOS ENDURECIDOS Y ESTERILES**  
Hacia el Estado del Arte para la Regeneración y Conservación de Suelos Volcánicos Endurecidos

Paul Quantin

**Motivación**

La meta de este programa de investigación fue determinar las condiciones sostenibles de la rehabilitación agrícola de los horizontes endurecidos y estériles de los suelos volcánicos, que afloran en la superficie por efecto de erosión, en varios países de América Latina.

Este programa integró las experiencias de un precedente titulado “ Estudio de Suelos Volcánicos Endurecidos “tepetates”, realizado en las cuencas de los estados de México y Tlaxcala, con la perspectiva de su rehabilitación agrícola.

Como consecuencia del interés de los resultados del primer programa, para el desarrollo de las regiones volcánicas muy pobladas en América Latina, la Comisión Europea nos sugirió extender nuestra investigación a otras regiones y países, de los cuales elegimos Ecuador y Chile, donde se tenían relaciones científicas. Además, se decidió diversificar y profundizar nuestra experimentación en México, con el objetivo de responder con una mejor adecuación a las condiciones de un desarrollo sostenible. Se trató de tomar en cuenta las condiciones físicas, agro-biológicas, socio-económicas y culturales de estas regiones, para proponer soluciones adecuadas.

**Objetivos**

La investigación se limitó a los “tepetates“ del Altiplano Central de México y a la “cangahua” del Valle Interandino de Ecuador; el estudio de los andosoles del sur de Chile (Valdivia) fue muy restringido. En México y en Ecuador se plantearon seis objetivos:

- 1.- Caracterización, génesis y cartografía de los horizontes endurecidos de suelos volcánicos, a fin de conocer su origen, sus propiedades y su extensión.
- 2.- Los factores químicos de la fertilidad potencial de los horizontes endurecidos cultivados, materia orgánica y nitrógeno, actividad microbiana y microorganismos simbióticos, evolución de estos factores con el tiempo.
- 3.- Experimentación agronómica y productividad orientado a la eficiencia de la fertilidad mineral y orgánica, la inoculación de microorganismos simbióticos, la evaluación de alternativas económicas y sostenibles, ensayo de cultivos, evaluación de prototipos rotacionales de cultivos y opciones para un manejo adecuado de las prácticas culturales.
- 4.- Análisis socioeconómico de la rehabilitación agrícola y forestal de los horizontes volcánicos endurecidos, investigación de unidades de producción rurales como Sistemas Económicos Familiares, la rentabilidad de la producción agrícola y de la reforestación.

5.- Erodabilidad y conservación de suelos volcánicos endurecidos cultivados, erosividad de las lluvias, medición del escurrimiento y de la erosión con el efecto de varios tratamientos de cultivo y de conservación, impacto de la evolución de los estados de superficie con el efecto de estos tratamientos.

6.- Observación del funcionamiento hídrico de tepetates naturales y cultivados, evaluación de la reserva hídrica, análisis de los flujos de elementos en suspensión y en solución.

En el sur de Chile, el objetivo fue único y más específico: evaluar la aptitud a la erosión de los andosoles recientemente sometidos a una explotación agro-pastoril.

### **Caracterización, génesis y cartografía de suelos volcánicos con horizontes endurecidos y estériles**

El tema compete a la problemática que plantea la necesidad de conocimiento de base, para fundamentar los principios de la experimentación y luego su aplicación.

#### **En México.**

En el Valle de México y la región de Tlaxcala se realizó un estudio detallado, de 1989 a 1992, el cual posteriormente continuó hasta 1995.

A la fecha se tiene la distribución clara de los tepetates según topoclimosecuencias, así como la estratigrafía de los depósitos volcánicos, de los cuales provienen, y su cartografía (Peña y Zebrowski, 1992; Werner, 1992).

Posteriormente la tesis de Hidalgo (1995), permitió explicar el endurecimiento de los tepetates de tipo "fragipan" sobre los cuales se hizo nuestra experimentación, explicando que la fuerte "cohesión" al estado seco se debe a un "empacamiento cara a cara" de las arcillas y una intercalación de un poco de sílice no cristalino.

Análisis de imágenes del satélite LANDSAT. El análisis basado sobre mapas y criterios de distribución de tepetates, establecidos anteriormente, permitió elaborar un modelo de cartografía de tepetates. En adición una recolección de datos de la UNAM y del INEGI a permitido experimentar un Sistema de información Geográfica en el dominio de los tepetates del altiplano central mexicano, el cual podría ser útil para la valoración de nuestros resultados.

#### **En Ecuador:**

La investigación se realizó de 1993 a 1996, en tres etapas: caracterización, cartografía y, evaluación de los afloramientos de tepetates por teledetección .

La caracterización y génesis. La cangahua aflora sobre los pie de montes del Valle interandino, entre 3200 y 2400 metros de altura, al igual que en el caso del tepetate, sus propiedades cambian según una topoclimosecuencia, arriba con un clima subhúmedo, es friable de tipo fragipan; abajo con un clima subárido, es duro, un poco silisificado y calcáreo, de tipo duripan cálcico. Su formación es anterior a la del suelo actual, al menos de 14,000 años a.c. de edad o más. Se observan dos o más horizontes de cangahua que se intercalan en una sucesión de depósitos volcánicos.

**Factores de fertilidad**

idad c

### **Evolución y mejoramiento de los factores de fertilidad.**

Durante el segundo programa en México, nos propusimos observar un mejoramiento del potencial de fertilidad en los tepetates cultivados en función del número de años de cultivo: por el incremento del contenido de humus, nitrógeno "lábil" y fósforo aprovechable, así como por el desarrollo de la actividad microbiana y por la inoculación de microorganismos simbióticos. Un complemento se tuvo con los estudios de la evolución de algunas propiedades físicas del tepetate cultivado y el desarrollo de las raíces de varios cultivos.

El estudio del estado nutrimental y productividad de los tepetates cultivados en medio campesino, en función del número de años de cultivo, nos permitió confirmar la hipótesis según la cual el potencial de fertilidad y la productividad van creciendo con el número de años del cultivo, se evaluaron parcelas con 1 a 60 años de recuperación. Sin embargo intervienen otros factores, especialmente la irregularidad y la insuficiencia de los abonos orgánicos y minerales en la agricultura tradicional, y el manejo agronómico de los cultivos.

El análisis de la dinámica de la materia orgánica, del nitrógeno y de la actividad microbiana, en función de la edad de las parcelas cultivadas, fue un estudio que contribuyó a probar una cierta correlación entre el incremento del reservorio orgánico y la tasa de nitrógeno mineralizable y lábil, así como de la actividad microbiana

La inoculación de microorganismos simbióticos con base en el estudio del efecto de bacterias fijadoras de nitrógeno, por medio de la inoculación con *Rhizobium* en varias leguminosas, con o sin adición de abono orgánico, debido a las pruebas obtenidas sobre su necesidad y las respuestas estimadas previamente para obtener mejores resultados en biomasa

A condición de verificar las condiciones de terreno y replicar los protocolos, las evidencias muestran que la inoculación de *Azospirillum* en maíz no fue eficaz.

La evaluación de endomicorrizas del género *Glomus* se realizó mediante la inoculación de estas especies sobre varias plantas, con o sin abono orgánico, dando resultados satisfactorios en *Eisenhardtia polystachia* y la cebolla (*Allium cepa*), pero no con el maíz. Esta experimentación debería proseguir con variedades de *Glomus* más específicas.

### **Experimentación agronómica y productiva**

#### **Protocolos y alcances en México.**

En México se probaron durante seis años (1991-1996) algunas prácticas tradicionales, así como prácticas alternativas con la finalidad de incrementar la productividad y la rentabilidad de los sistemas de cultivo, seleccionados como representativos de los sistemas económicos familiares locales.

La evaluación de prácticas y dosis de fertilización orgánica o mineral e inoculación con simbioses, en las cuales los objetivos fueron: comparar la eficacia de la fertilización orgánica y de la mineral, así como probar el efecto de la inoculación de microorganismos simbióticos. El propósito fue de probar eficiencias biológicas y evaluar las productividades, en su caso la óptima y a bajo costo, de acuerdo a condiciones locales de disponibilidad de recursos.

### maíz-haba

maíz-haba, entre las más importantes. Algunos cultivos o mezclas alternas, aplicaciones de abono orgánico, fertilización "starter", inoculación y los tratamientos.

Entre los resultados obtenidos destaca que: la inoculación de *Rhizobium* es solamente eficaz cuando se aplica junto a una dosis moderada de abono orgánico; el efecto del abono orgánico es amplificado; un abono mineral a dosis "starter".

La combinación de las dosis de abono orgánico y fertilización "starter" y de la inoculación podría ser una alternativa económica en lugar de la fertilización mineral sola. Los resultados de producción materia seca-grano de la asociación gramínea-leguminosa (trigo-medicago o maíz-haba) es sensiblemente más productiva que el monocultivo, en tepetate con varios años de uso agrícola.

### Efecto del número de años de cultivo.

En esta investigación el objetivo fue evaluar si la productividad de los tepetates aumenta conforme aumentan los años de cultivo. La investigación fue hecha en ensayos realizados de 1991 a 1996. En principio, en la primera etapa del programa la hipótesis proponía la correlación entre el número de años de rehabilitación del tepetate asociado al desarrollo de su aptitud productiva. Sin embargo, en la segunda etapa se cuestiona la hipótesis debido a la presencia de factores de riesgo de la producción. Entre estos los climáticos: especialmente una sequía excepcional o una helada precoz; en segundo lugar se demostró que es necesario mantener la fertilización mineral y orgánica a un nivel suficiente, teniendo en cuenta que su acumulación y su efecto residual es muy limitado. Los resultados de la segunda etapa condicionan los alcances de la hipótesis, no obstante son complementarios e indicativos de elementos necesarios para una reformulación de la misma.

### Efecto del cultivo precedente.

Los resultados demuestran que la producción es más alta después de un cultivo de maíz asociado a haba que con un precedente trigo. Seguramente debido a un efecto residual de la leguminosa ( fijación de nitrógeno); también los resultados nos sugieren que puede ser rentable con trigo o cebada.

### La estimación de rentabilidad en la fertilización moderada.

Los resultados indican que la fertilización mineral u orgánica es rentable en avena o frijol, pero no para el maíz, debido a que este cultivo necesita una dosis mayor que la recomendada, como condición para obtener una buena eficiencia reproductiva. En su caso, no es productiva ni rentable una fertilización moderada.

### Experimentación de prácticas agronómicas para el cultivo de maíz.

En éstas evaluaciones se probaron varias prácticas: A) profundidad de labranza de 4 determinándose que con 40 cm son suficientes. B) Labranza tradicional en surco versus labranza mínima: se evaluó el problema de la labranza mínima que es el riesgo de acame de las y sugiere continuar esta evaluación y/o cambiar el modo de siembra. C) Surcos simplificados variados según las especies. Positivo para el haba, malo para el maíz, no obstante se sugiere la evaluación. Cultivos asociados de gramíneas con leguminosas/monocultivo; el efecto de los asociados es globalmente positivo.

### **Protocolos y alcances en Ecuador.**

La experiencia fue más modesta en comparación a las actividades realizadas en México.

Las evaluaciones se realizaron durante dos años: 1994-1995 y 1995-1996. La comparación de resultados se realizó entre dos estaciones: La Tola en clima húmedo, y la estación Cangahua en clima subárido, en ésta última se aplicó riego de auxilio..

En las dos estaciones se comparó el abono orgánico con la fertilización mineral , ambos asociados, con dosis similares a las de México. Entre los resultados se observó que el maíz produce más con abono orgánico y riego en clima subárido, que en clima subhúmedo. No obstante, un factor de confusión llevó a tratar de precisar si fue un problema climático o varietal.

Un ensayo en la comunidad campesina de Licto, en la Provincia de Riobamba, mostró que la productividad de la cebada puede ser buena desde el primer año de cultivo en condiciones moderadamente costosas, es decir en terrazas con pendiente reducida por un muro de bloques de cangahua, fragmentación semigruesa por una labranza única. Se apreció que la rehabilitación agrícola puede ser productiva con un costo moderado.

### **Análisis socioeconómico de la rehabilitación agrícola y de la reproducción forestal.**

La metodología se orientó hacia la selección y estudio de las condiciones agroecológicas locales y la identificación de los riesgos más importantes. Se privilegió la realización de entrevistas a informantes clave, autoridades y de encuestas generalizadas en las localidades seleccionadas, con el fin de precisar criterios de selección de unidades familiares, desde la perspectiva de la diversidad existente desistemas de producción.

El propósito fue realizar un análisis del funcionamiento de diferentes modalidades de sistemas de producción existentes; en su caso identificar algunos atributos socioeconómicos de los mismos, además de los inherentes al sistema de producción, con la finalidad de tratar de comprender, en su caso, su funcionamiento ampliado y más complejo que puede combinar con las actividades propiamente productivas, otras como el jornalero local o regional, actividades a domicilio entre los miembros como costura o comerciales como son las múltiples tiendas familiares rurales, la cada vez más frecuente migración temporal o permanente y sus relaciones económicas con la familia. Esta unidad de análisis se denominó sistema económico familiar (SEF).

El producto esperado del análisis de funcionamiento de los sistemas era la clasificación de los SEF, con el objetivo de evaluar el interés del uso de tepetate o cangahua como suelo; así como conocer la problemática socio-económica y cultural de su uso agrícola.

En México. Después de dos series de encuestas de la primera etapa en los estados de Tlaxcala y México, la investigación fue reformulada y ampliada hacia otras regiones del eje Neovolcánico, éstas en los estados de Tlaxcala, México, Michoacán y Jalisco. Resultados genéricos nos muestran la gran variación en el interés del tepetate como recurso suelo, así como en las estrategias de su uso.

En Ecuador. La investigación se realizó de una manera sistemática sobre el conjunto de las áreas con cangahua del Valle Interandino, en particular en dos comunidades de referencia al norte del Ecuador: Cayambe y Bolívar.

En complemento a las acciones realizadas en México y Ecuador, se realizó una encuesta sobre la repoblación forestal de las áreas con tepetate o cangahua.

Los principales resultados nos muestran que en ambos países, las regiones de estudio son muy pobladas y pobres, con una producción agrícola tradicional, la cual asegura principalmente el autoconsumo y la supervivencia. Regiones en donde es dominante el minifundio.

En Ecuador, en las áreas con cangahua, más del 80% de las familias tienen menos de 3 ha. En México esa tasa es variable de una región a otra y la superficie generalizada entre los agricultores varía de 2 a 10 ha por familia.

La Cangahua o tepetate en tales condiciones económicas y sociales son un recurso de suelo necesario. El cultivo base para el autoconsumo es el maíz. El área dedicada a cultivos comerciales o pastizales es muy reducida.

La disponibilidad de medios de producción es muy limitada. Muy frecuente el recurso menos escaso es la mano de obra familiar, como capital humano que incluso tiene reducidas opciones de costo de oportunidad fuera de la región. No obstante su oportunidad marginal, las necesidades exigen recursos complementarios de un ingreso exterior.

Sin embargo, la rehabilitación del tepetate o de la cangahua como suelo agrícola necesita una gran inversión, tanto de trabajo como financiera. Las evidencias bajo esas condiciones, muestran que ciertos agricultores a menudo manejan estos suelos rehabilitados como agrícolas, sin fertilizarlos más.

En Ecuador, por falta de fertilizantes y de selección varietal el rendimiento medio del maíz en grano es solamente de 500 kg/ha. Mientras que en México, con un mejor manejo, se alcanzan rendimientos 3 o 4 veces superiores.

El modo de la roturación es también diferente. En Ecuador a menudo es manual, con pico, muy costoso por el tiempo de trabajo, y el suelo obtenido es poco profundo. Sin embargo, se encuentran en proceso de evaluación unos protocolos de roturación mecanizada o semi-mecanizada, complementados con la construcción de terrazas con muro de bloques de cangahua, para obtener una pendiente progresiva reducida.

El costo de este tipo obra fue de 830 a 1050 US \$/ha. En México desde hace 20 o 30 años, la roturación es mecanizada, ya sea en terrazas planas, o con pendiente reducida. El costo del subsoleo es de US\$ 350 a 550/ha. El costo total construyendo terrazas varía entre US\$ 1600 a 2100 /ha.

Una estimación económica a primera vista podría recomendar que la rehabilitación de tepetates o cangahua necesita un programa de ayuda, tanto al financiamiento como a la capacitación de los campesinos. Ciertamente, no obstante, la evidencia de la rehabilitación creciente del tepetate nos sugiere continuar con estos estudios e incursionar en la función de la estrategia familiar al invertir en su rehabilitación.

La repoblación forestal. Una oportunidad para proteger y valorizar las áreas erosionadas con cangahua o tepetates. Una evaluación del costo ha sido hecha en el Valle de México: con el sistema de reforestación con terrazas entre US\$ 945 a 1280 /ha; con el sistema de reforestación con trincheras de US\$ 260 a 410 /ha.

### **Erodabilidad y conservación de suelos volcánicos endurecidos cultivados.**

La investigación de la erosión consiste en la medición de la erosividad de las lluvias, del escurrimiento superficial y de la pérdida de tierra. Esta es complementada con observaciones de los estados de superficie, y sus efectos sobre el escurrimiento y la erosión, tanto con lluvias naturales como con lluvias simuladas.

#### **Régimen de lluvias y erosividad.**

En México se utilizaron dos estaciones principales: S. M. Tlaxpan, cerca de Texcoco en el valle de México, y Tlalpan, en el estado de Tlaxcala.

El coeficiente de erosividad medio anual ( $R_{us}$ ) varió entre 150 en San Miguel a más de 400 en Tlalpan. La variabilidad interanual de la altura de precipitaciones y del número de lluvias fuertemente erosivas ( $> 50$  mm/h durante  $> 30$  min.) con 3 a 6 eventos por año, es muy fuerte en relaciones de 1 a 2. Las lluvias fuertes son escasas, pero causan cerca de la mitad de la erosión global anual, cerca de 80% de las lluvias son poco intensivas y no erosivas.

En Ecuador se utilizaron 2 estaciones, en Tola en clima subhúmedo y en Cangahua en clima subárido. El coeficiente de erosividad anual de las lluvias es respectivamente, cerca de 200 y 100. El número respectivo de lluvias fuertemente erosivas es de 4 a 2 por año, pero hay también una fuerte variabilidad interanual y estacional.

#### **Medición de escurrimiento y erosión.**

Durante 1990-91, la experimentación fue hecha solamente en pequeñas parcelas de  $44$  m<sup>2</sup> de referencia, del tipo "Wischmeier". Un objetivo en la segunda etapa fue: medir la erosión sobre parcelas del tamaño más cercano a las parcelas de los agricultores: estas en México fueron de 500 a 1000 m<sup>2</sup> de superficie, con pendiente moderada (4 a 6%). En Ecuador de 100 m<sup>2</sup> con pendiente del 15%. Otro objetivo: probar unos modelos de cultivos tradicionales y otros de cultivos alternativos, con el fin de mejorar la productividad y la conservación de suelos.

Sin embargo, en México se continuó en forma paralela con mediciones sobre pequeñas parcelas de tipo Wischmeier, en Tlalpan 3 parcelas con tepetate natural, tepetate roturado desnudo, tepetate cultivado con maíz sembrado en surcos. En Tlaxpan se realizó una experimentación más compleja para precisar los parámetros de un modelo de predicción de la erodabilidad del tepetate, en donde se comparó el tepetate natural con el tepetate roturado, sometidos a varios tratamientos como escarda, protección de una malla, entre otros. El cultivo utilizado fue el trigo.

En México y en Ecuador se realizaron observaciones de la evolución de los estados de superficie, con lluvias naturales o simuladas, con el fin de determinar los factores de la erosión según varios tratamientos.

### **Estación Tlaixpan, Texcoco, México.**

La experimentación se realizó durante cuatro años, de 1993 a 1996. La comparación se realizó entre un suelo agrícola, el tepetate natural y el cultivado. Se rehabilitaron cinco terrazas con tepetate cultivado, sometido a rotación de cultivos, sucesivamente: cebada, maíz+ haba, maíz +haba, cebada o maíz+ haba. Los tratamientos fueron: profundidad de laboreo 40-60 cm; aplicación de abono orgánico y de fertilización mineral; fragmentación media-fina; labranza para el maíz en surcos o en camas para la cebada, surcos tradicionales o cruzados (contreo).

Los resultados mostraron, no obstante, la presencia de dos factores más importantes que los tratamientos probados. Un factor de distribución espacial considerando que las terrazas de arriba eran más erosionables que las de abajo; una fuerte variabilidad interanual, considerando que la erosión es mucho menor un año poco lluvioso.

Los factores evaluados: profundidad de roturación, aplicación de abono orgánico y/o fertilización mineral, preparación de agregados: en general se apreciaron de poca importancia en la generación de comportamientos diferenciados, sea en la exploración de potencialidades. Aunque aparenta ser la labranza en surcos un poco más eficaz que la labranza en camas, así como el contreo ser mejor que la labranza tradicional.

### **Estación de Tlalpan, Tlaxcala, México.**

La experimentación se realizó durante 1995 y 1996. El protocolo consistió en el establecimiento de tres terrazas, todas con cultivo de maíz.

La comparación utilizó tres tratamientos de labranza: tradicional en surcos, labranza mínima con y sin cultivo intercalado de leguminosa. La labranza mínima con cultivo intercalado fue tan eficaz como la labranza tradicional.

### **Estaciones en Ecuador (Tola y Cangahua)**

Los experimentos fueron en los ciclos 1994-1995 y 1995-1996. En cada estación se establecieron tres parcelas, con pendiente del 15%: la primera sin obra de conservación; la segunda con un muro antierosivo aguas abajo, de bloques de cangahua; la tercera con riego al inicio del cultivo, con el propósito de adelantar la cubierta vegetal antes de las primeras lluvias.

En la Tola había además una corta pendiente reducida (2%) casi plana, para probar el efecto de pendiente. Los cultivos de cebada o avena se hicieron sin abono. Los resultados mostraron que el efecto de un muro de cangahua es tan eficaz como la pendiente reducida.

### **En Chile, Estación de Paillahuente, Valdivia.**

Las parcelas fueron pequeñas (37 m<sup>2</sup>), estaban localizadas sobre un andosol, con pendiente muy fuerte (28%). El clima es muy lluvioso con más de 4000 mm/año. La duración se realizó un año (1995-1996).

### Aptitud Productiva en Suelos Volcánicos Endurecidos (tepetates)

El número de parcelas cultivadas fue de 6, en las que se estableció una franja empastada de retención de sedimentos, de 1 m de ancho, cada 15 m de longitud. Así como dos parcelas de pradera. La meta era probar el control de la erosión sobre las colinas preandinas, recientemente convertidas de bosque a uso agro-pastoral. Los resultados mostraron: que con un manejo moderado los andosoles tienen una capacidad de infiltración suficiente para controlar el escurrimiento y mantener la erosión casi nula.