

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS

**ESTÁNDARES Y CRITERIOS DE
REHABILITACIÓN DE SUELOS SOMETIDOS A
EXTRACCIÓN DE ÁRIDOS**

Manuel Casanova P.
Julio Haberland A.
Oscar Seguel S.
Cristian Kremer F.
Wilfredo Vera E.
Carlos Benavides Z.

Santiago, 2008

LA EXTRACCIÓN

Desde el año 2003 a la fecha se ha estado extrayendo arena subsuperficial en los suelos de la Estación Experimental Germán Greve Silva de la Universidad de Chile, Comuna de Maipú (33° 28` LS- 70° 50` LW), Santiago. El sector posee un clima templado cálido, con lluvias que presentan un monto muy variable año a año, y que en promedio alcanzan los 317 mm, las cuales se concentran en los meses de invierno, con un periodo seco que puede alcanzar hasta 10 meses. El material objeto de la extracción corresponde a una estrata de arena de alta pureza, la que se encuentra subyaciendo a un Inceptisol de la Serie Rinconada de Lo Vial, Familia franca, gruesa, mixta, térmica de los Typic Xerochrepts.

A la Serie Rinconada de Lo Vial pertenecen suelos de origen aluvial, estratificados, ligeramente profundos, cuyo solum varía entre 43 y 107 cm. Se presentan en terrazas planas, con o sin microrelieve, del río Mapocho. La clase textural es franco arenosa a franco arenosa muy fina, siendo ocasionalmente areno francosa. A una profundidad de 110 cm en promedio, se observa un horizonte indurado, que corresponde a un fragipán desarrollado a partir de clases texturales arenosas o areno francosas, impenetrable para las raíces. El drenaje del suelo varía de bueno a imperfecto, presentando nivel freático bajo los 120 cm. La densidad aparente varía de 1,6 Mg m⁻³ en superficie a 1,7 Mg m⁻³ en profundidad. La Figura 1 presenta una visión general del suelo previo a la extracción de áridos.



Figura 1. Sector correspondiente a una fase de la Serie Rinconada de Lo Vial, sin mayores limitantes para un rendimiento potencial alto de maíz.

El material de extracción se encuentra por debajo del primer metro de profundidad del perfil de suelo, observándose estratas sucesivas de arena con una potencia entre 2 y 4 m. Los horizontes superficiales de suelo son removidos y apilado en fajas o camellones alrededor del sitio de extracción con maquinaria pesada (normalmente retroexcavadora), generándose un terraplén previo a la extracción propiamente tal (Figura 2).



Figura 2. Terraplenes generados luego de la remoción de horizontes superficiales, dejando expuesto el material a extraer.

Con posterioridad a la remoción de los horizontes superficiales de suelo, la extracción de áridos procede en un espesor de 2 m en promedio. Luego, el operador de la máquina distribuye los horizontes de suelo, notablemente alterados, sobre el piso dejado por la extracción; por lo tanto, es evidente que el suelo restituido a su lugar de origen, ve reducida su cota en casi 2 m, presenta un microrelieve distinto al original y muchas de sus propiedades han cambiado.

Estos hechos determina la necesidad de cambiar drásticamente la forma de manejar el suelo restituido. Entre las alteraciones más importantes se observa un cambio en su porosidad (densidad aparente), en su consistencia (queda suelto), una cierta incapacidad de soporte para cualquier tipo de maquinaria agrícola, una baja fertilidad natural y un nivel freático casi en superficie. Todo esto, dificulta sustancialmente su rehabilitación (Figura 3).



Figura 3. Disposición final del suelo. En primer plano, el terraplén de material edáfico con abundante microrelieve y nivel freático a escasa profundidad. Al fondo, fajas de suelo sin desparramar.

LA REHABILITACIÓN

Se considera que el material distribuido post-extracción ha perdido todas características y cualidades para seguir denominándose suelo; dado que no existe una horizonación relacionada a procesos pedogénicos, se ha perdido por completo su estructura natural y no sustenta ninguna carga en superficie. Consecuentemente, la rehabilitación pasa por solucionar simultáneamente dos aspectos principales:

- generar una capacidad de soporte y
- aumentar el contenido de materia orgánica.

El último aspecto tiene relación con los aspectos de fertilidad, retención de agua y estructuración del sustrato, el que posterior a su reposición queda con una clase textural areno francosa, dada la mezcla que se produce durante la extracción de arena.

La pre-compactación

La pre-compactación de suelos es una práctica correspondiente a una labor de asentamiento o re-arreglo de las partículas y/o agregados, a través de una carga mecánica en superficie (tensiones externas), sin incurrir en un aumento excesivo de la resistencia mecánica del suelo.

Una labor de pre-compactación en suelos excesivamente sueltos provoca una disminución de la macroporosidad ($>50 \mu\text{m}$), con un aumento de poros de almacenamiento de agua. Junto con ello, en el rango de potencial mátrico de los cultivos agrícolas ($> -100 \text{ kPa}$), aumenta la conductividad hidráulica. En sectores con pendiente, la pre-compactación aumenta el escurrimiento y el riesgo de erosión, pero en suelos arenosos muy permeables podría disminuir la lixiviación de nutrientes.

Una labor de pre-compactación adecuada favorece la relación de fases para el desarrollo de la fitomasa, lo que se traduce en un aumento de la producción vegetal. Además, con esta labor se acelera el asentamiento, lo que incrementa la capacidad de soporte del suelo posterior a la disturbación. Así, es posible definir un asentamiento óptimo como aquel grado de pre-compactación en el que se logra la mejor relación entre sustentabilidad mecánica y funcionalidad del sistema poroso.

En términos prácticos, la pre-compactación se realiza con un rodillo de masa conocida que genere la presión requerida para sustentar el posterior paso de un tractor. Al momento de distribuir el suelo, la retroexcavadora puede realizar la pre-compactación con el rodillo, sin embargo, es necesario controlar el contenido de agua al momento de realizar esta labor.

El Cuadro 1 presenta el resultado final del paso de un rodillo entre 0 y 200 h posteriores a un riego prolongado, en el sitio post-extracción estudiado.

Cuadro 1. Cambio en densidad aparente del suelo a dos profundidades luego del paso de rodillo compactador.

Tiempo post-riego (h)	Da (Mg m ⁻³)		Δ (Mg m ⁻³)
	0-20 cm	20-30 cm	
0	1,25 a	1,35 a	0,10
24	1,35 b	1,40 a b	0,05
50	1,41 b	1,44 a b	0,03
200	1,52 c	1,48 b	-0,04

Con el suelo húmedo, existe una mayor transmisión de tensiones en profundidad, aumentando la densidad aparente (Da) hasta los 30 cm; mientras que al secarse, la disipación de cargas ocurre en superficie. Los valores del Cuadro 1 resultaron menores a la Da del suelo sin disturbar (entre 1,6 y 1,7 Mg m⁻³), por lo que en general no existe riesgo de una pre-compactación excesiva. Los mismos ensayos del Cuadro 1 generaron los mayores rendimientos de un cultivo de fréjol (*Phaseolus vulgaris*) cuando el suelo se pre-compactó en valores de Da entre 1,35 y 1,45 Mg m⁻³. Sin embargo, es necesario tener presente que con una aplicación de enmienda orgánica, los niveles óptimos de Da se encontrarán a valores aún más bajos.

Los valores de resistencia a la penetración medidos al final del cultivo, aumentaron hasta los 30 cm a valores de entre 200 y 280 kPa, medidos a capacidad de campo, considerándose un valor crítico de 300 kPa para un suelo de textura gruesa. Bajo los 30 cm disminuye hasta 100 kPa, lo que indica que en una temporada de cultivo se genera el asentamiento necesario para el tránsito de maquinaria agrícola.

Una alternativa a la compactación con rodillo la constituye el propio paso de la retroexcavadora desparramando el suelo. Este tipo de maquinaria, al poseer una oruga como medio de movilización, distribuye su peso en una gran superficie, facilitando su “flotación” en la arena suelta (lo que no es posible con un tractor con rodillo) y generando cargas que se encuentran en el rango de la maquinaria agrícola (Figura 4).

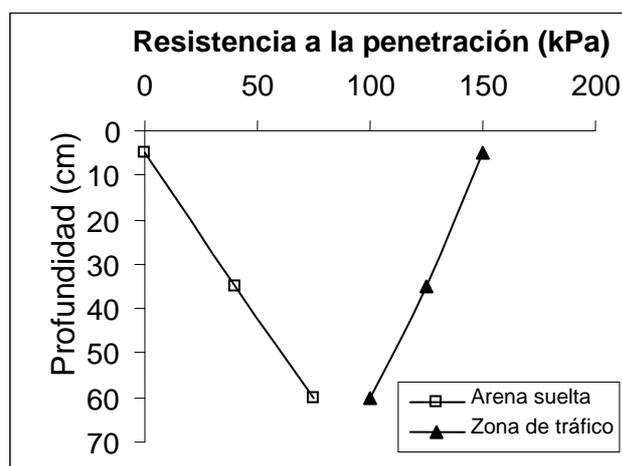


Figura 4. Resistencia a la penetración vertical medida con un penetrómetro de cono. Se compara un sector de arena suelta con un sector medido bajo la huella de la retroexcavadora.

El aumento en profundidad de la resistencia a la penetración en una arena suelta es normal, ya que responde a su propia masa. No es posible generar una capacidad de soporte con el paso de un tractor, ya que la baja superficie de contacto del neumático hace que éste se hunda en la arena. La retroexcavadora en cambio genera valores

adecuados en superficie, los que se transmiten en profundidad; sin embargo, hay que tener presente dos aspectos prácticos importantes:

(1) la pre-compactación con retroexcavadora se debe realizar con un material seco al aire, cualquier contenido de agua extra generará una compactación excesiva y,

(2) debe asegurarse un único evento de tránsito, la segunda pasada por el mismo sitio generó valores en superficie mayores a 300 kPa.

Inmediatamente realizada esa labor, sería conveniente el paso de un tractor con una rastra de discos.

La aplicación de enmiendas orgánicas

La extracción de áridos, además de generar una pérdida estructural, provoca la mezcla de horizontes, con lo cual se homogeniza el suelo. Esto resulta en una distribución de nutrientes y materia orgánica (MO) en todo el perfil, generando disminuciones de sus contenidos por efecto dilución. El Cuadro 2 presenta algunas propiedades químicas del material de suelo restituido al sitio, post extracción de arena.

Cuadro 2. Resultado análisis químico de suelo.

Propiedad	Unidad de expresión	Contenido
pH		7,23
MO	(%)	0,55
CE	(dSm ⁻¹)	6,87
N	(mg kg ⁻¹)	9,00
P	(mg kg ⁻¹)	6,00
K	(mg kg ⁻¹)	224,00

Considerando el contenido de MO superficial del suelo no disturbado (2%) y su CE (3 dS m⁻¹), con mezcla del perfil generada por la extracción del sustrato arenoso, disminuye la fertilidad natural del suelo, por lo que los cultivos a implementar requerirán dosis elevadas de N y P. En el caso del K, sus valores permanecen altos. Por otra parte, la cercanía al nivel freático provoca aumentos de la conductividad eléctrica (CE), lo que restringirá el uso de cultivos sensibles a la salinidad.

Las aplicaciones de enmiendas orgánicas, si bien no incrementarán en forma importante los niveles de nutrientes del suelo, tendrán un efecto sobre la dinámica de éstos, asociada a la dinámica del agua, ya que afectará la retención de agua y nutrientes y su movilidad dentro del perfil. El primer impacto de la enmienda orgánica será la disminución de la densidad aparente (Figura 5) la que debe compatibilizarse con una adecuada resistencia mecánica.

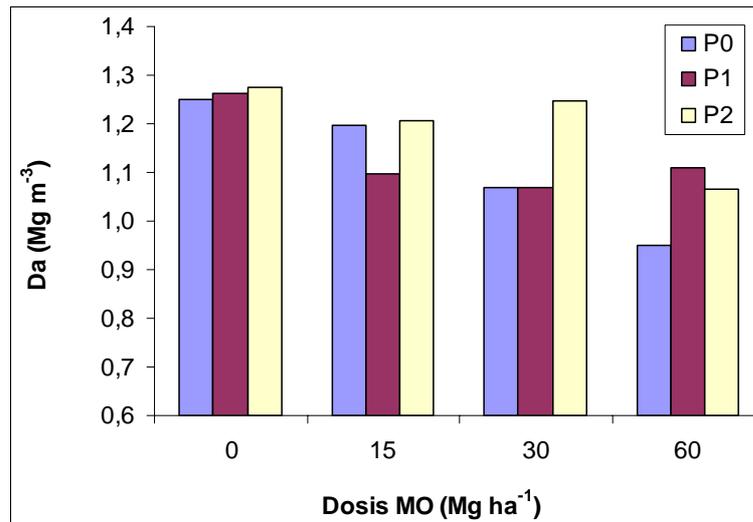


Figura 5. Densidad aparente (Da) en función de dosis crecientes de cama de broiler. El P0 corresponde a un tratamiento sin pre-compactar, mientras que P1 y P2 son niveles crecientes de pre-compactación.

Las mediciones de la Figura 5 fueron realizadas con posterioridad a un cultivo de arvejas (*Pisum arvensis*), por lo que ya existe cierta redistribución de partículas por los ciclos de riego y el efecto de las raíces del cultivo. La tendencia general es a la disminución de la Da al aumentar la dosis orgánica, no existiendo tendencias claras entre los niveles de pre-compactación. Los mejores rendimientos de materia seca se obtuvieron con la dosis de 15 Mg ha⁻¹ (Figura 6).

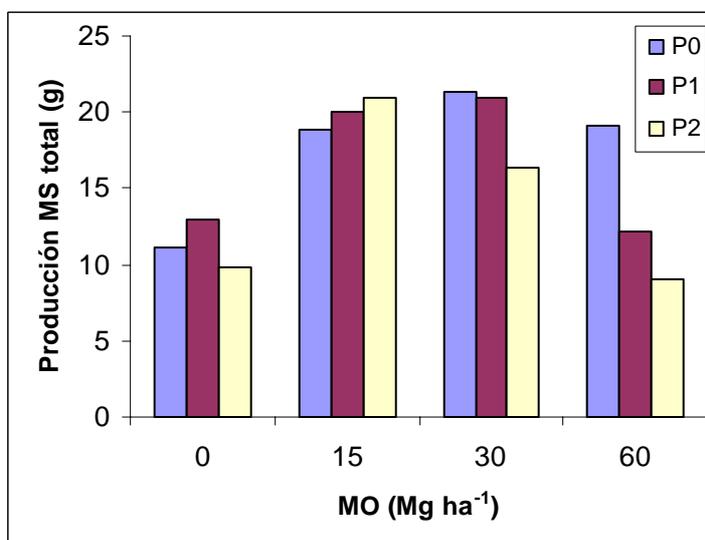


Figura 6. Producción de materia seca (MS) total de un cultivo de arveja con niveles crecientes de enmienda orgánica y pre-compactación.

Al analizar los tejidos por separado, se observa una mayor producción de materia seca de raíces cuando no se aplican enmiendas; sin embargo, la parte aérea tiene una mayor producción, resultando los datos totales de la Figura 6. Si bien los tratamientos sin enmienda orgánica de la Figura 5 no alcanzan los niveles óptimos de Da antes señalados (1,35 a 1,45 Mg m⁻³), se debe tener en cuenta que cualquier aplicación de enmienda orgánica genera una redistribución del tamaño de poros, afectando la funcionalidad del mismo. En este sentido, siempre se mantuvo una porosidad gruesa mayor al 20% (que corresponde a un suelo con buena aireación) superando el 30% para las dosis óptimas de

enmienda orgánica (15 a 30 Mg ha⁻¹). En cuanto a la porosidad de agua útil para la planta, ésta varió entre 15 y 20% para los distintos tratamientos, aumentando a un 23% con la dosis de 60 Mg ha⁻¹.

Las enmiendas orgánicas, si bien en dosis óptimas pueden generar una disminución de la resistencia a la penetración, en suelos de texturas gruesas, al distribuirse en el espacio poroso entre las partículas puede provocar una disminución en el tamaño de poros, con menor porosidad de aireación, mayor retención de agua e incluso mayor resistencia mecánica. Este fenómeno se puede apreciar en la Figura 7, donde se contrasta la dosis más alta con el testigo sin aplicación de enmienda.

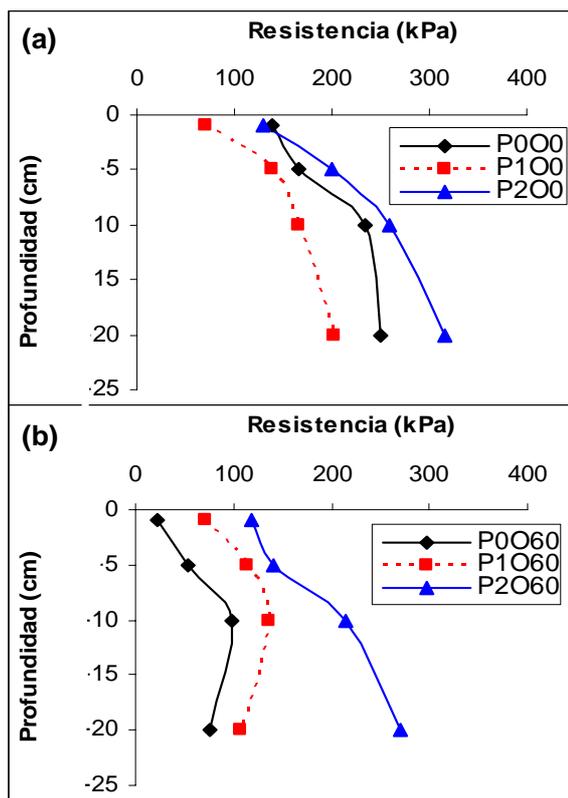


Figura 7. Resistencia a la penetración para los niveles (a) mínimo y (b) máximo de enmiendas, con niveles crecientes de pre-compactación (P0 < P1 < P2).

El asentamiento natural de las partículas provoca el reordenamiento de ellas, con el incremento de resistencia mecánica (Figura 7a) hasta niveles cercanos a un valor crítico de un cultivo agrícola (300 kPa), especialmente si se realiza una labor de pre-compactación. Cuando se aplica una enmienda orgánica (Figura 7b), se previene la generación de una resistencia mecánica excesiva, aunque ciertos niveles de pre-compactación podrían generar valores altos dentro del perfil. En este caso, la Figura 7 demuestra la inconveniencia de una dosis excesivamente alta de MO, siendo recomendables dosis de entre 15 y 30 Mg ha⁻¹ con valores de Da de 1,1 a 1,2 Mg m⁻³. En cuanto al tipo de residuo orgánico, es necesario realizar más estudios para ver la conveniencia técnico-económica de las alternativas de uso.

LA PROTECCION DEL SITIO POST-EXTRACCION

Las faenas de extracción de materiales desde el suelo (áridos), sus excavaciones, y la depositación de escombros asociadas, inducen cambios enormes, de corto plazo en los suelos, y más aparentes que los señalados anteriormente. En este sentido, se desprenden cantidades muy significativas de partículas y sedimentos, valores que pueden ser 10 a 100 veces superiores a los observados en suelos no alterados.

Los principios básicos efectivos para reducir la erosión del suelo y el transporte de partículas, forman la base de un plan de protección y control de degradación por estas faenas. Entre otros se destacan:

- Mantener áreas disturbadas lo más pequeñas y tiempos de exposición lo más cortos posibles.
- Proteger el área disturbada contra la escorrentía desde zonas elevadas; es decir, instalar cierto control del perímetro.
- Mantener en el sitio velocidades de escorrentía bajas.
- Estabilizar progresivamente las áreas disturbadas
- Retener sedimentos en el sitio.
- Controlar la fuente de erosión.
- Retener en lo posible la vegetación existente
- Inspeccionar y mantener las medidas de control.
- Las medidas de control temporal y permanente son en general absolutamente diferentes – se debe asegurar que el diseño para las medidas temporales sea conservador.

En el Cuadro 3 se incluyen algunas medidas para contrarrestar la eventual degradación de suelos de tipo erosivo.

Cuadro 3. Medidas de protección de suelos sujetos a faenas de movimiento de suelos

Control de erosión	Medidas
Manejo del sitio	Gestión del proyecto que reconoce y trata consideraciones de erosión y control de sedimentos. Sistemas de control de escorrentía.
Manejo del agua	Canales y lomos de desviación
	Represas
	Drenes en curvas de nivel o pendiente controlada.
	Ductos
Estabilización de taludes	Empastadas
	Mulch
	Geotextiles
Control de sedimentos hacia cauces	Medidas
	Pozos de retención de sedimentos
	Lomos de retención de sedimentos
	Cercos de filtro (silt fences)
	Entradas y salidas de ductos protegidas
Control de sedimentos hacia la atmósfera	Medidas
Planificación	Plan de manejo de polvo
Implementación	Agua
	Supresores de polvo
	Estabilización de superficie
	Otras opciones (sales y agua, etc.)

Gráficamente en Anexo, se indican algunas de las medidas anteriores

Recomendaciones finales

Dados los antecedentes y experiencias recopiladas por el equipo de trabajo, la rehabilitación del suelo post-extracción de áridos queda sujeta a los siguientes manejos:

- Pre-compactación del sitio, la que se puede realizar mediante dos metodologías: pasada de rodillo, hasta alcanzar una densidad aparente a 30 cm de profundidad de entre 1,2 a 1,3 Mg m⁻³ o, pasada de oruga de la retroexcavadora, hasta alcanzar una resistencia mecánica de 100 kPa a 60 cm de profundidad. Esta última alternativa debe considerar las recomendaciones antes señaladas, y requiere del paso de un tractor con una rastra liviana, inmediatamente después de la labor de pre-compactación.
- Aplicación de una enmienda orgánica, durante dos años consecutivos, en dosis de 15 Mg ha⁻¹ cada año. Se propone esta dosis por compatibilidad con la legislación vigente, recomendando el uso de compost, el que presenta una mayor estabilidad y un menor aporte de sales. La enmienda debe ser mezclada con los primeros 20 cm de suelo. Esto asegurará subir el contenido de materia orgánica de un 0,5 a más de 1,0% en el plazo de dos años.
- Fertilización con fuentes de N y P en dosis de 500 kg de urea ha⁻¹ y 80 kg de superfosfato triple ha⁻¹. Junto con ello, siembra de un cultivo forrajero (avena) en dosis de 200 kg ha⁻¹. La fertilización se debe parcializar en dos oportunidades: un tercio en la siembra y dos tercios en macolla.
- Establecimiento del sistema de drenaje diseñado como parte del proyecto de extracción de áridos.
- Al cabo del primer año de cultivo, es necesario nivelar los terrenos para favorecer el drenaje y el riego.
- Se hace necesario tener presente los principios básicos para reducir la erosión del suelo y el transporte de partículas, en la forma de un plan de protección y control de degradación de suelos por estas faenas de extracción.

Análisis general de costos

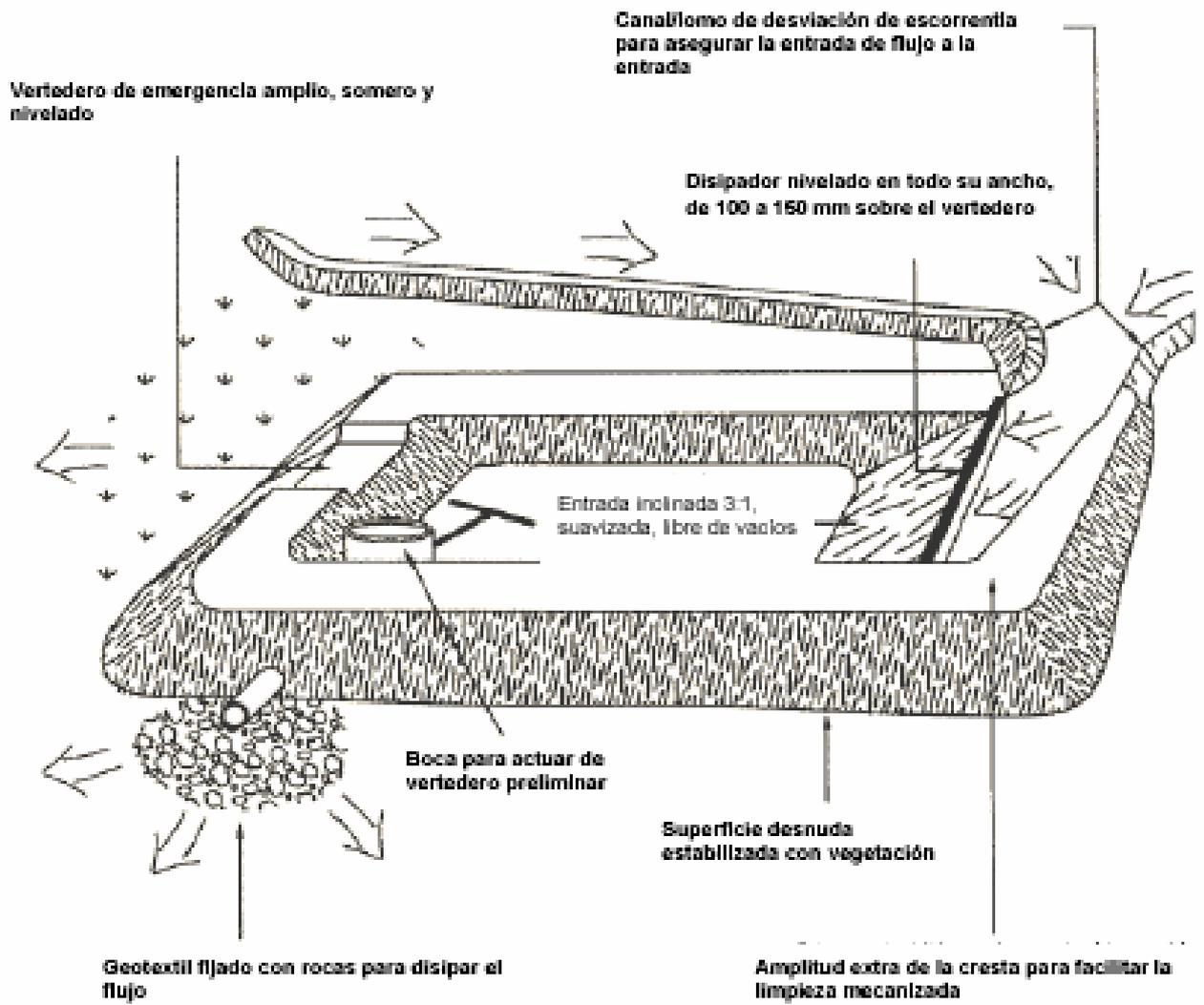
Los costos por hectárea se desglosan en:

- Pre-compactación, 40 horas de retroexcavadora a \$30.000 h ⁻¹	\$ 1.200.000
- Tractor con rastra de discos, 1 jornada	\$ 40.000
- Enmienda orgánica (compost), 15 toneladas equivalentes a 30 m ³	\$ 360.000
- Traslado compost	\$ 200.000
- Incorporación compost, tractor con coloso y cuatro personas, mas posterior rastraje, dos jornadas	\$ 100.000
- Fertilización con 500 kg de urea	\$ 200.000
- Fertilización con 80 kg de superfosfato triple	\$ 60.000
- Semilla de avena (200 kg ha ⁻¹)	\$ 40.000
- Siembra de avena, primera dosis de fertilizantes (tractor con sembradora, 1 jornada)	\$ 60.000
- Segunda aplicación de fertilizantes, 1 jornada	\$ 40.000
- Riegos por tendido	\$ 120.000
- Control de malezas	\$ 120.000
- Segunda aplicación de enmienda orgánica	\$ 360.000
- Traslado compost	\$ 200.000
- Nivelación de suelos (topografía y maquinaria)	\$ 300.000

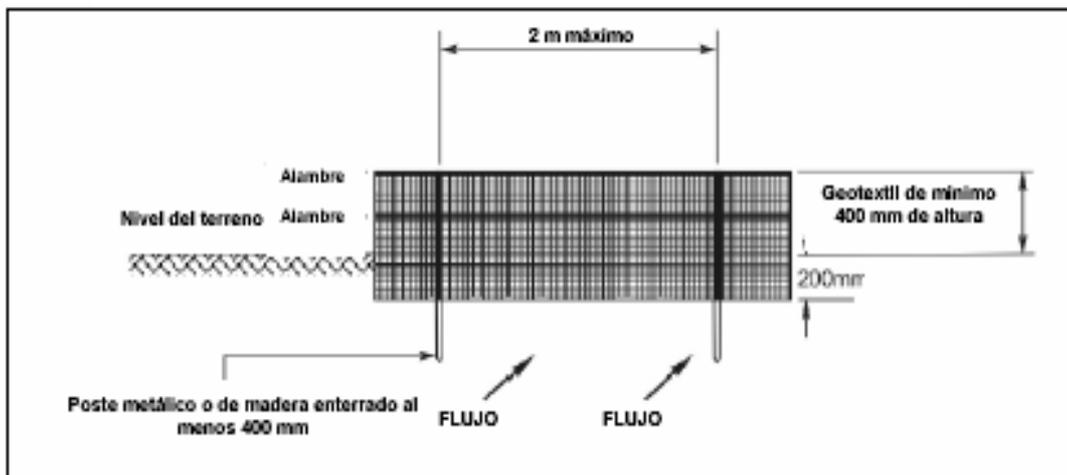
A partir del segundo año se pueden establecer cultivos comerciales, los que se espera tengan una baja rentabilidad, alcanzando un nivel óptimo al quinto año.

Para el caso de los potreros con más de dos años desde la extracción de áridos, la capacidad de soporte se ha regenerado en forma natural, por lo que no es necesaria la labor de pre-compactación. Sin embargo, existe un costo de control de malezas aproximado de \$ 120.000 ha⁻¹.

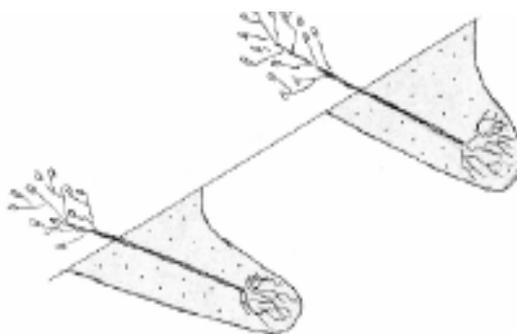
1. Pozo de sedimentación



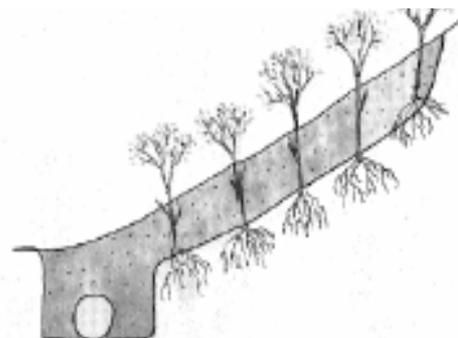
2. Cercos filtro (silt-fences) de vegetación o geotextil



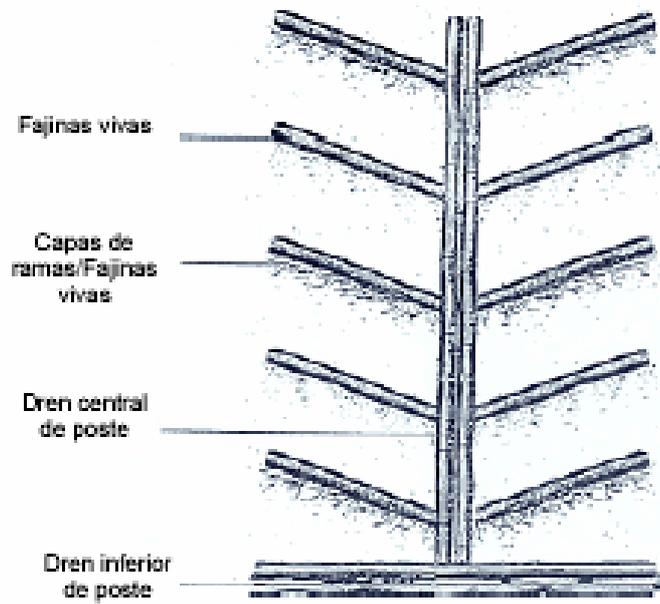
3. Corte y plantación



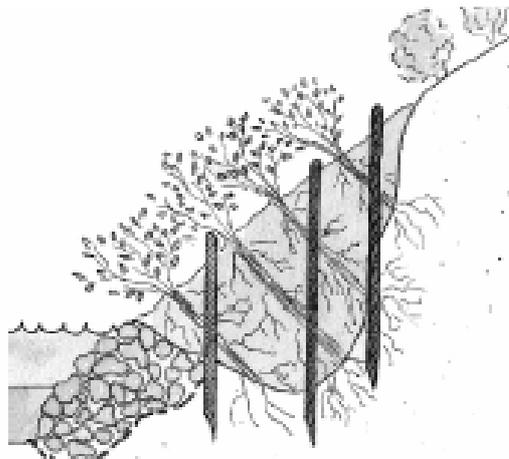
4. Drenes de grava



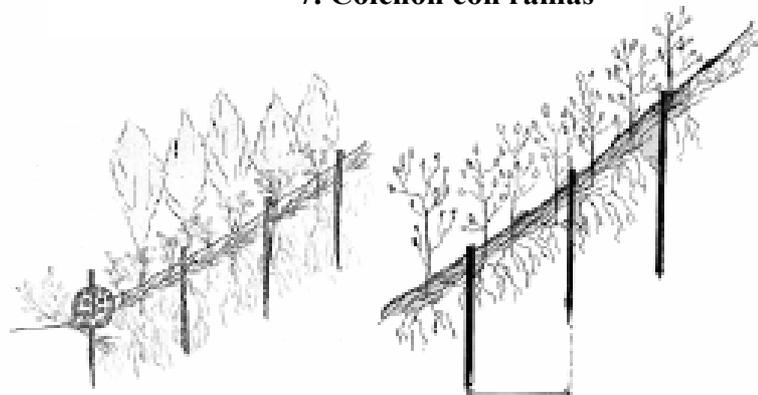
5. Fajinas, capas de rama y dren poste



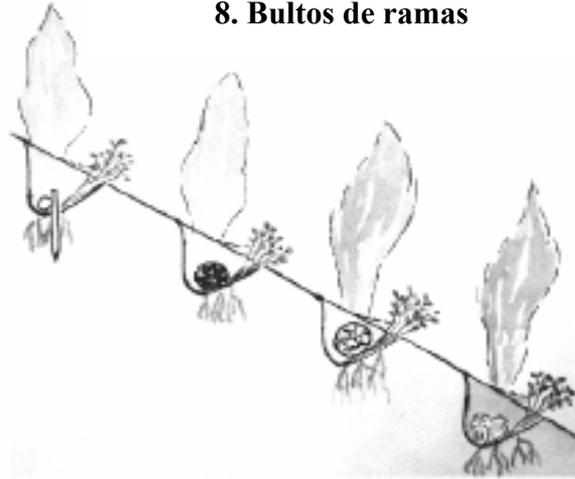
6. Embalaje con ramas



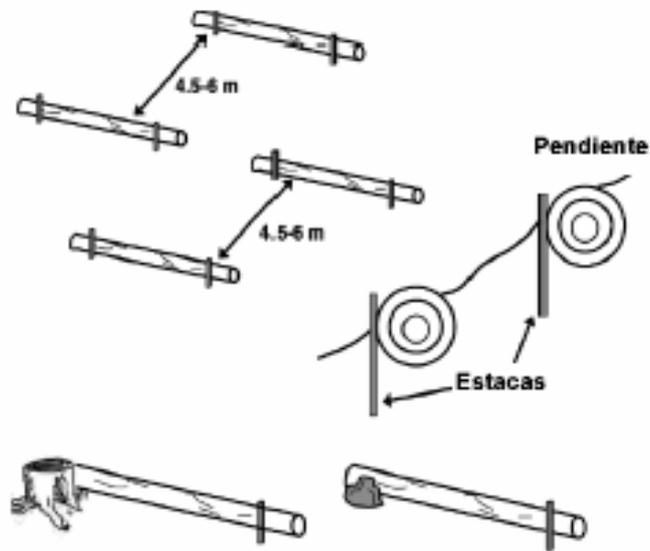
7. Colchón con ramas



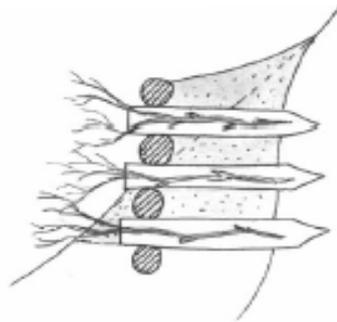
8. Bultos de ramas



9. Terrazas de troncos



10. Paredes vivas



11. Colocación de geotextiles

