

# Caracterización hidrodinámica de un suelo volcánico endurecido del Ecuador (cangahua), influencia de los estados de superficie

Yann LEROUX, Jean-Louis JANEAU

## **Abstract**

*The bare and cultivated indurated pyroclastic formations of the Equatorial Sierra (cangahuas) are strongly susceptible to pluvial erosion. Their reincorporation to agriculture allows a partial control of ground loss and offers an alternative solution for agriculture management. Rain simulation gives information about imbibition, infiltration, runoff and erodibility. The «quadrat point» method enabled us to observe the evolution of surface features (rugosity, crusting and sealing of porosity). We make three campaigns of simulation just after the soil preparation, before and after the barrowing. We observed the variations of hydrodynamic parameters and the evolution of superficial structural features. A rough soil preparation (coarse particle size) enhance the infiltration rate and reduce the soil loss. On the contrary, a fine sized preparation weakens the roughness and seals the porosity by a superficial crusting. Then the efficiency of the running water is enhanced.*

**Keywords:** *Agregates - Cangahua - Ecuador - Hydrodynamic - Infiltration - Quadrat Point - Surface Reorganization - Rugosity - Rainfall Simulation - Volcanic Soils - Sediment Moving - Turbidity*

## **INTRODUCCIÓN**

La intensificación de la agricultura en el Ecuador se explica por un fuerte crecimiento demográfico desde mediados de siglo y se acompaña de un aumento en la demanda de superficies cultivables. Se observa un ascenso de los cultivos hacia las altas laderas del callejón interandino, donde las condiciones climáticas no son favorables a la agricultura y, frecuentemente, las técnicas de conservación de suelos son inexistentes (De Noni *et al.*, 1986). Esto se debe al abandono de las zonas de piedemonte, más propicias para los cultivos, debido a la erosión de los suelos agrícolas y al consecuente afloramiento de la cangahua.

La cangahua es un material proveniente de las antiguas proyecciones piroclásticas (más de 15.000 años), duro, estéril y sensible a la erosión hídrica. Su rehabilitación, que contribuiría a solucionar los problemas agrícolas, es objeto actualmente de un programa de estudio del ORSTOM con el aporte financiero de la Unión Europea (contrato ERB-

TS3\*CT 930252). La finalidad de dicho programa es la valorización de esos suelos degradados que constituyen campos cercanos a las zonas de habitación, y el control parcial de la erosión de los mismos. Tal rehabilitación consiste en la roturación y la pulverización del material. Con el afán de caracterizar el comportamiento hidrodinámico de este material incorporado al cultivo, se utilizó la simulación de lluvia. Esta herramienta permite no solo determinar los parámetros elementales de la hidrodinámica superficial, sino también apreciar la erosión del suelo. De esta manera se puede observar la influencia de la técnica de preparación de los fragmentos de la cangahua así como de la pendiente y de la cobertura vegetal en la capacidad de infiltración y de escurrimiento de las diferentes parcelas cultivadas según ciertas prácticas locales.

## MATERIAL Y MÉTODOS

### El sitio de estudio

El sitio de estudio forma parte de la hacienda de la Tola perteneciente a la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Central de Quito. Está ubicado en la comuna de Tumbaco, 20 km al Este de la capital ecuatoriana, en las faldas del volcán Ilaló, a una altitud de 2 600 m.s.n.m. Según Custode *et al.* (1992), el sitio es representativo de las zonas de cangahua del callejón interandino. En esta región del piedemonte, el clima es de tipo ecuatorial seco de montaña. Se caracteriza por precipitaciones anuales promedio de aproximadamente 730 mm repartidas en un período de octubre a junio interrumpido por una corta estación seca de diciembre a febrero. Esta última puede provocar un déficit hídrico muy importante para los cultivos.

### Las parcelas de estudio

La cangahua de La Tola es una toba alterada. Su granulometría (cuadro 1) es francoarenosa. Contiene solamente 7 % de arcilla y 33 % de limo fino.

	Arcilla	Limo fino	Limo grueso	Arena fina	Arena gruesa	H <sub>2</sub> O
La Tola	7,34	33,06	11,54	32,43	11,13	2,41

**Cuadro 1 - Resultados granulométricos de la cangahua del sitio La Tola (en %)**

Una vez despejado el suelo superficial con un buldózer a fin de no conservar sino la cangahua, el trabajo efectuado el 19 de febrero consistió en roturar la cangahua con la ayuda de un pico

hasta una profundidad promedio de 25 cm y en una superficie de alrededor de 9 m<sup>2</sup> por parcela (lo que requiere para cada parcela 3 horas de trabajo por persona). Posteriormente, se prepararon las parcelas rompiendo los bloques de tierra de modo que se obtuvieran tres tamaños promedio de agregados. El número de parcelas instaladas en el sitio fue de 11. Seis estaban destinadas a las medidas en condiciones de simulación de lluvia y las otras cinco expuestas a las lluvias naturales. Estas últimas permiten apreciar la representatividad de las lluvias simuladas. Las parcelas fueron acondicionadas siguiendo la topografía irregular del terreno, tenían pendientes del 4,4 al 21,2 por ciento. Para delimitar el área de medición, se instalaron parcelas de 1 m<sup>2</sup>. Se dejaron algunas parcelas al desnudo (T), otras se sembraron con maíz (M) o cebada (O), y se escogieron diferentes tratamientos de cultivo a fin de apreciar la influencia de las diversas coberturas vegetales en la hidrodinámica superficial (cuadro 2).

Lluvias	Simulación						Lluvias naturales				
	STFT	SFT	SFM	SGT	SGM	SGO	NFT	NFM	NGT	NGM	NGO
Nombre											
Tipo de preparación	muy fina	fina	fina	gruesa	gruesa	gruesa	fina	fina	gruesa	gruesa	gruesa
Cultivo	testigo	testigo	maíz	testigo	maíz	cebada	testigo	maíz	testigo	maíz	cebada
Pendiente (por ciento)	4,4	11,6	16,4	15,9	21,2	5,8	9,8	13,1	11,6	15,9	15

**Cuadro 2 - Características de las parcelas de estudio**

Se distinguen tres tipos de preparación del suelo (cuadro 3):

Preparación estructural	muy fina	fina	gruesa
> 5 cm	0	14	39
de 2,2 a 5 cm	5,6	16	11
de 0,3 a 2,2 cm	57,7	39	33
< 0,3 cm	36,7	31	17

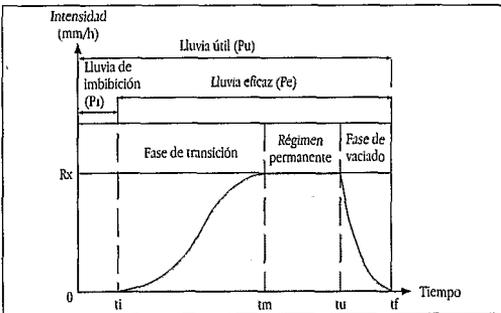
**Cuadro 3  
Granulometría de los agregados obtenidos  
a partir de las diferentes preparaciones  
(% del peso húmedo total)**

- la preparación «muy fina» (TF) se compone de agregados inferiores a 5 cm con una mayoría de fragmentos comprendidos entre 0,3 y 2,2 cm;
- la preparación «fina» (F) es heterogénea con un predominio de fragmentos inferiores a 2,2 cm (poco diferente a la muy fina) pero contiene algunos agregados superiores a 5 cm;
- la preparación «gruesa» (G) está constituida de partes iguales de fracciones gruesas de tamaño superior a 5 cm y de fragmentos finos comprendidos entre 2,2 y 0,3 cm.

El tamaño promedio de los agregados resultantes de la preparación de la cangahua, la pendiente, y la cobertura vegetal son las principales variables capaces de influir en la hidrodinámica superficial.

**El simulador de lluvia**

El mini-simulador de lluvia, diseñado por Asseline y Valentin (1978), permite reproducir el hidrograma generado por la lluvia simulada sobre las parcelas (Figura 1) y obtener los siguientes parámetros :



**Figura 1 - Hidrograma de una lluvia simulada**

- la lluvia de imbibición (Pi) que, según Lafforgue (1977), corresponde a la suma de la altura de agua (wi) infiltrada en el suelo en un tiempo ti y de la altura de la lámina de agua almacenada en la superficie bajo la forma de charcos, antes de la aparición del escurrimiento Si = S (ti), de modo que Pi = wi + Si;
- el coeficiente de infiltración mínima. Durante la fase de imbibición, la capacidad de infiltración del suelo es superior a la intensidad de la lluvia;

posteriormente disminuye tornándose, en un momento dado, inferior a la intensidad de la lluvia y apareciendo entonces el escurrimiento. Durante esta fase llamada también régimen transitorio, la infiltración baja. La capacidad de infiltración del suelo sigue disminuyendo hasta un valor mínimo ( $F_n$ ). Es el régimen permanente de infiltración mínima que corresponde al régimen permanente de escurrimiento máximo ( $R_x$ ), de modo que :  $F_n = I - R_x$ ;

- la lámina escurrida ( $L_r$ ) es medida directamente en el desagüe de la parcela lo que permite comparar el comportamiento de las diferentes parcelas ante el escurrimiento, pues la altura de las láminas precipitadas es idéntica para todas. Ella no toma en cuenta los componentes de la lámina escurrida total que incluye las retenciones superficiales recuperables ( $D_r$ ). Por ello, se utilizará el coeficiente de escurrimiento útil  $K_{ru}$  calculado de la siguiente manera:  $K_{ru} = (L_r + D_r) / P_u \times 100$ .

Por otro lado, las muestras de agua del escurrimiento recolectadas permiten, una vez que la muestra de agua turbia ha sido secada y pesada, obtener la carga sólida (turbiedad) y el peso de los sedimentos transportados. Dicha turbiedad corresponde a la eficiencia de la lámina escurrida, en función de la intensidad del aguacero, para desplazar los materiales arrancados por el efecto *splash* y por el flujo de esa misma lámina de agua. A la escala del metro cuadrado, esos sedimentos representan el transporte sólido ( $C$ , en  $g/m^2$ ), utilizándose generalmente el término erosión en una superficie mínima de una hectárea ( $E$  en  $t/ha/año$ ).

### Protocolo de simulación

Con el fin de apreciar las variaciones del comportamiento en función del grado de reorganización superficial de las parcelas, se efectuaron tres campañas de simulación (I, II y III), las mismas que tuvieron lugar inmediatamente después de la preparación de las parcelas, antes del primer aporque y después del mismo.

Con el objeto de acercarnos a las características pluviométricas naturales del sitio, se decidió proceder a tres series de lluvia (1, 2 y 3) con cuatro intensidades diferentes de 20 minutos cada una (figura 2). Las dos últimas intensidades simuladas, 60 y 80 mm/h, representan intensidades excepcionales para el sitio de estudio. Se determinaron intervalos de 3 y 12 horas entre las lluvias, lo que permitió obtener tiempos diferentes de secado del suelo.

### Las medidas del micro-relieve

Las medidas del micro-relieve y de la cobertura vegetal se efectuaron mediante el método del punto cuadrado. La herramienta de medición consiste en una tabla vertical

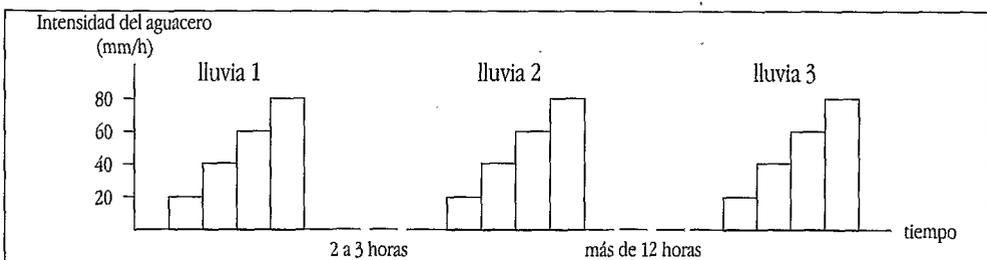


Figura 2 - Intensidades del protocolo de simulación

sobre la que se deslizan un conjunto de agujas separadas por una distancia de 5 cm. Esta tabla se coloca sobre la parcela de estudio de 1 m<sup>2</sup> y se desplaza cada 5 cm, lográndose medir la altura de 361 puntos de la parcela en cuestión.

Los cambios del relieve corresponden a la suma de las diferentes alturas entre dos medidas, deduciéndose de ella el índice de rugosidad del suelo (IR) que es el cociente entre la línea quebrada B y la línea recta L. La longitud de B se calcula sumando las hipotenusas que unen las bases de dos agujas (5 cm).

Las reorganizaciones superficiales corresponden a las variaciones de los tipos de organización de la superficie. Se distinguieron dos tipos, particular y pelicular (Casenave y Valentin, 1989).

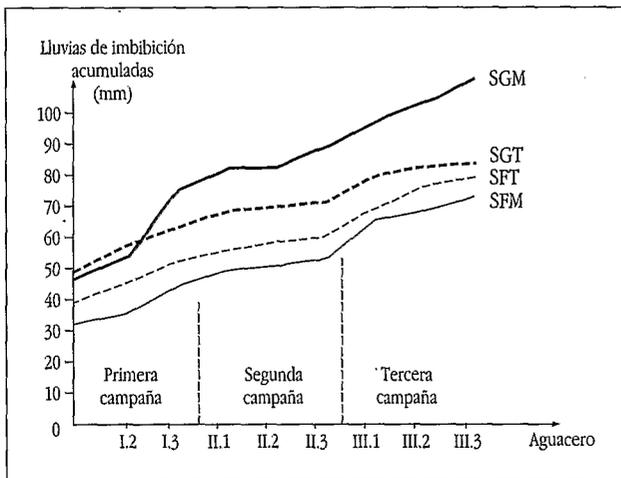
Las primeras reúnen todos los agregados de la superficie clasificados según su tamaño, mientras que las segundas corresponden a las costras arcillo-limosas. Se encuentran principalmente:

- las costras estructurales de gran rugosidad;
- las costras de erosión formadas por un solo micro-horizonte muy poco espeso y que corresponden al decapado de la costra estructural;
- las costras de escurrimiento compuestas de micro-horizontes arenosos que alternan con delgadas películas plásmicas, y se distinguen por su grano-clasificación, en este caso no muy marcada.

## RESULTADOS Y ANÁLISIS

### Las lluvias de imbibición

La figura 3 representa las lluvias de imbibición acumuladas a todo lo largo del estudio. Se puede observar una clara diferencia en el comportamiento de la imbibición por una parte entre las parcelas y por otra entre las campañas de simulación.



**Figura 3**  
Lluvias de imbibición acumuladas

En efecto, desde la primera lluvia, las parcelas con preparación gruesa (SGT y SGM) reciben hasta 10 mm de lluvia adicionales con respecto a las parcelas con preparación

fina (SFT y SFM) antes del escurrimiento. Esta diferencia se mantiene a todo lo largo de los aguaceros de cada campaña. Se observará también que la parcela «gruesa» de fuerte pendiente (SGM) presenta una capacidad de imbibición mayor que su homóloga de pendiente débil (SGT), pero la primera está cultivada con maíz y la segunda desnuda. En todas las parcelas se observa (figura 3) que las pendientes son más fuertes en el caso de la primera y tercera campañas. Esto refleja una altura de agua infiltrada más importante que la de la segunda campaña.

La relación  $P_i = w_i + S_i$ , con  $w_i = C(H_s - H_o)$  permite verificar la influencia de los factores y de las condiciones estructurales sobre las lluvias de imbibición.

- $(H_s - H_o)$  es el déficit de saturación de agua del suelo, en donde  $H_s$  es la humedad relativa después de la lluvia y  $H_o$  la humedad relativa antes de la lluvia;
- $C$  es un coeficiente independiente de  $H_o$  en relación con la intensidad de la lluvia;
- $S_i$  es un término que reúne los factores de intercepción (de la lluvia), de almacenamiento y de resistencia a la imbibición.

Los diferentes parámetros de esta ecuación (cuadro 4) muestran que existe una correlación entre el déficit de humectación del suelo y las alturas de las lluvias de imbibición que son función del tamaño de los fragmentos. Mientras más fina es la preparación, más se acercan globalmente esos coeficientes al valor 1 o, dicho de otra manera, mientras más gruesa es la preparación, menos dependiente es la lluvia de imbibición de ese déficit hídrico.

Preparación	muy fina	fina		gruesa		
Nom	STFT	SFT	SFM	SGC	SGT	SGM
Pendiente (por ciento)	4,4	11,6	16,4	5,8	15,9	21,2
Coefficiente de correlación	0,943	0,429	0,465	0,650	0,268	0,263
$S_i$	3,15	2,65	2,32	1,35	4,69	7,03

**Cuadro 4 - Parámetros de la ecuación  $P_i = w_i + S_i$ , en las parcelas de simulación**

Por otro lado, los factores de intercepción no son homogéneos, aunque son mayores en las parcelas «gruesas» (4,69 y 7,03) que en las «finas» (2,32 y 2,65). La débil pendiente en la parcela «muy fina» (STFT) aumenta el valor del índice de intercepción. La heterogeneidad de los bloques de la preparación gruesa favorece el secado del suelo (evaporación más importante que en la preparación fina); el déficit de humectación aumenta pero es ante todo la importancia de los accidentes del micro-relieve lo que determina las alturas de las lluvias de imbibición. La preparación fina, en cambio, reduce los factores de intercepción de la superficie (excepto en una pendiente débil), pero el déficit de humectación influye en gran medida en las alturas de las lluvias de imbibición.

Estas primeras observaciones permiten poner en evidencia que la altura del agua que imbebe el pedazo superficial de tierra trabajada es mayor en la preparación gruesa que en la fina.

### La infiltración mínima

Lafforgue (1977), Collinet y Valentin (1979) proponen un modelo para apreciar la variación de la intensidad mínima de infiltración  $F_n$  en función de la intensidad del aguacero  $I$ .

Como en las parcelas de este estudio no se respetan las condiciones de superficie homogénea, la ecuación en este caso es una función lineal creciente:

$$F_n = (1 - K) I + KI_1$$

en donde K es una constante para las condiciones iniciales del suelo e  $I_1$  es la intensidad límite de escurrimiento.

Las pendientes de las funciones  $F_n = f(I)$  así como los valores de  $I_1$  están ligados a las características de los estados superficiales y a los estados hídricos iniciales. Según los mismos autores, a medida que aumenta el déficit de saturación de agua del suelo, se incrementa la pendiente de la función  $F_n = f(I)$  y el valor  $I_1$ .

Las representaciones gráficas (figura 4) de las funciones de  $F_n = f(I)$  permiten diferenciar la capacidad de infiltración durante cada campaña de simulación.

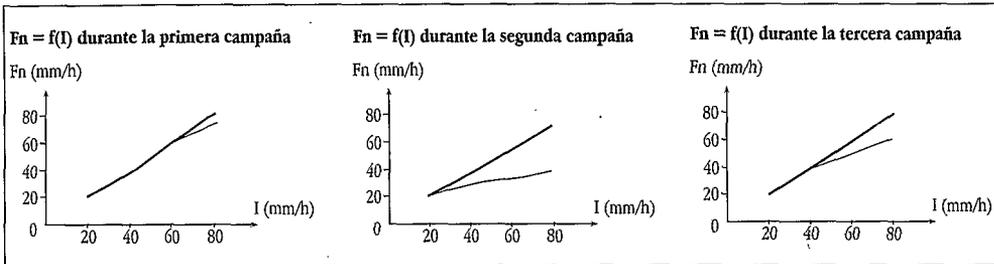


Figura 4 - Representación gráfica de  $F_n = f(I)$

Durante la primera campaña posterior a la preparación de las parcelas, el aspecto general de las líneas traduce una importante porosidad superficial y un aumento en la capacidad de infiltración debido a una estructura sumamente porosa y una sumersión parcial de la superficie debida a la lámina de agua. Los coeficientes de infiltración ( $K_{fn} = F_n / I \times 100$ ) son del orden de 100 a 91,8 % en el caso de las parcelas gruesas y de 100 a 96,6 % en el de las finas.

Durante la segunda campaña, el aspecto de las líneas se distingue en función del tipo de preparación. Las parcelas gruesas conservan un comportamiento similar al observado cuando la primera campaña, mientras que las parcelas revelan un nivel mínimo de infiltración ( $F_n$ ) alcanzado desde intensidades de aguacero de 60 mm/h, con coeficientes de infiltración mínima del orden del 60 %.

Durante la tercera campaña que sigue al aporque, se observa de nuevo un comportamiento similar al de la primera campaña, aunque las intensidades de infiltración mínima de las parcelas finas tienden a bajar progresivamente. La amplitud de las variaciones de  $F_n$  es del 33,4 % en el caso de las parcelas finas y del 4 % en el de las parcelas gruesas.

La observación de las variables de la ecuación  $F_n = (1 - K)I + KI_1$  (cuadro 5) permite, como explican Lelong y Trevisan (1992), obtener una apreciación de la conductividad hidráulica.

$$K = V / i$$

en donde: V es la velocidad de infiltración

i la gradiente de carga hidráulica

K la conductividad saturada puntual del área sumergida.

Tratamientos y pendiente (porcentaje)	Testigo (TF) 4,4		Testigo (F) 11,6		Maíz (F) 16,4		Cebada (G) 5,8		Testigo (G) 15,9		Maíz (G) 21,2	
	1-K	$I_1$ mm/h	1-K	$I_1$ mm/h	1-K	$I_1$ mm/h	1-K	$I_1$ mm/h	1-K	$I_1$ mm/h	1-K	$I_1$ mm/h
Ref. lluvias	Primera campaña											
I.1	1,22	28,44	1,00	33,72	1,02	28,14	1,01	31,89	1,00	21,68	1,00	9,23
I.2	1,31	25,41	1,01	20,23	1,02	10,00	1,06	25,70	1,03	22,36	1,01	18,81
I.3	1,11	20,80	1,01	22,35	1,04	21,15	1,08	24,20	1,12	24,46	1,02	26,50
	Segunda campaña											
II.1	2,12	23,14	2,00	21,24	1,65	22,25	1,06	18,01	1,36	19,71	1,10	23,70
II.2	2,91	19,76	2,11	17,64	2,11	20,36	1,08	17,44	1,32	9,88	1,08	16,51
II.3	3,18	17,64	2,18	15,90	1,88	13,95	-	-	1,33	10,30	1,08	12,89
	Tercera campaña											
III.1	-	-	1,05	25,50	1,05	22,57	-	-	1,12	27,01	1,03	26,08
III.2	-	-	1,20	22,21	1,48	24,35	-	-	1,13	13,36	1,02	17,32
III.3	-	-	1,30	18,70	1,92	20,49	-	-	1,18	16,34	1,03	20,57

Granulometría: TF = muy fina, F = fina, G = gruesa

**Cuadro 5 - Variables de la ecuación  $F_n = f(I)$  de las parcelas**

En el presente caso, mientras mayor es el índice  $(1 - K)$  —o el valor absoluto de  $K$ —, mayor es el cociente  $V/i$ , o, dicho de otro modo, menor es la carga hidráulica. Se observa entonces que la degradación de la conductividad hidráulica es tanto más importante cuanto más fina es la preparación, lo que se explica por el relleno de la porosidad superficial por parte de las partículas finas.

**Las medidas del micro relieve: rugosidad, reorganizaciones superficiales.**

La reducción de la infiltración se acompaña de una variación del micro-relieve. En efecto los índices de rugosidad (cuadro 6) según el tipo de clasificación granulométrica muestran una disminución de la rugosidad del suelo, más importante en la preparación fina que en la gruesa.

Referencia parcela	SFT	SGT
Preparación (T)	fina	gruesa
Antes de la primera campaña	1,09	1,15
Antes de la segunda campaña	1,04	1,10
Antes de la escarda	1,02	1,13
Después de la escarda	1,16	1,32
Antes de la tercera campaña	1,13	1,29

**Cuadro 6  
Resumen de los índices de rugosidad de dos parcelas representativas**

De manera general, la rugosidad disminuye hasta el final de la segunda campaña, antes de la formación de camellones. El aporque remodela la superficie y aumenta entonces el índice de rugosidad, el mismo que es correlacionado con las diferentes capacidades

de infiltración. Como lo explica Raheliarisoa (1984), la heterogeneidad de la superficie retrasa la aparición del escurrimiento aumentando la capacidad de almacenamiento de la superficie bajo forma de charcos, tornando más lenta la formación de la costra de superficie e incrementando la porosidad que se ofrece a la infiltración. Las parcelas gruesas con un alto índice de rugosidad presentan una mayor capacidad de infiltración.

Las medidas de las diversos tipos de organización superficial (figura 5) permiten poner en evidencia que las formaciones laminares (costras) son numerosas en la parcela de preparación fina durante el período anterior al aporque. La movilización de las partículas más finas para la formación de costras se ve favorecida por el crecimiento del flujo de la lámina escurrida, el mismo que es facilitado por un bajo índice de rugosidad. La sinusoidalidad de la superficie disminuye la velocidad de la lámina y por lo tanto su capacidad de erosión favoreciendo la sedimentación. Las costras (principalmente estructurales y de erosión) alcanzan, antes del aporque, un recubrimiento del 50 % en las parcelas finas, y solo del 35 % en las gruesas.

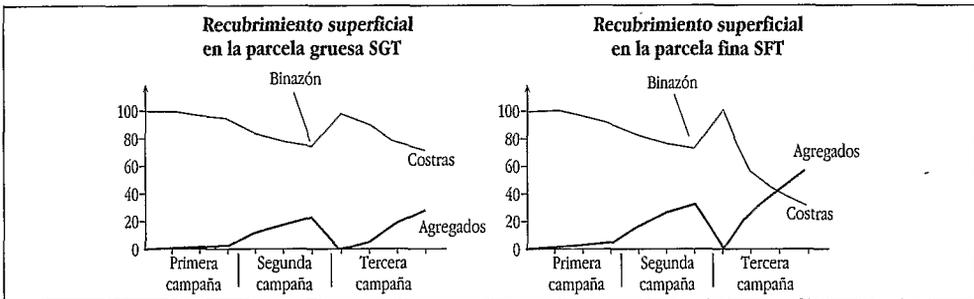


Figura 5 - Evolución del recubrimiento superficial en las parcelas testigo

El aporque reinstaura temporalmente una macroporosidad, pero la permanencia de su efecto depende de la estabilidad de las estructuras y del tamaño de las partículas. En efecto, durante la tercera campaña, las costras aparecen más rápidamente que durante la primera, aunque son menos extensas en la preparación gruesa que conserva un elevado índice de rugosidad.

### Lámina de escurrimiento

#### *Influencia del tipo de preparación y del tiempo de secado entre las campañas de simulación de lluvia*

La lámina escurrida acumulada es claramente dependiente del tipo de preparación de las parcelas (figura 6) aunque también del tiempo de secado entre lluvias.

Durante la primera campaña, los totales escurridos son relativamente bajos y poco diferenciados en las dos preparaciones, lo que se explica por una importante infiltración debida a una porosidad suficientemente gruesa que, sin embargo, en una fuerte pendiente, genera un flujo interno entre el horizonte no trabajado y el suelo roturado.

Durante la segunda campaña, se observa un aumento casi lineal de las alturas de escurrimiento, que corresponde a un descenso de los valores de los niveles de infiltración mínima. La infiltración es menor y por lo tanto el escurrimiento más importante en las

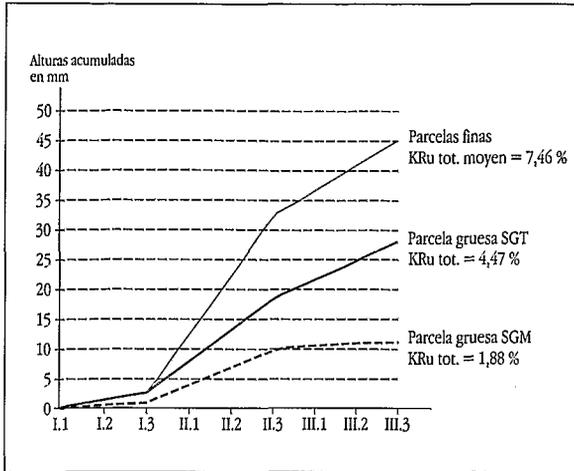


Figura 6 - Lámina escurrida acumulada

parcelas finas. Así, al final de la segunda campaña, las alturas acumuladas en esas parcelas alcanzan valores cercanos a los 33 mm frente a apenas 10 a 17 mm en el caso de las parcelas gruesas. Los coeficientes de escurrimiento útil (KRu), que representan la altura del agua que sale de la parcela con respecto a la altura total precipitada, confirman este resultado.

El trabajo del suelo entre la segunda y tercera campañas explica que las láminas escurridas obtenidas durante la última campaña, aunque elevadas, sean menores que aquellas obtenidas durante la segunda y ello en el caso de ambos tipos de preparación.

Nombre Preparación Pendiente (por ciento)	SFT fina 11,6		SGT gruesa 15,9	
	Coef. de apl.	Dr (mm)	Coef. de apl.	Dr (mm)
Referencia lluvias				
Primera campaña	46,7	43	61,8	8
Segunda campaña	42,2	668	56,4	413
Avant le sarclage	34,2	-	48,8	-
Tercera campaña	80,2	177	87,0	165
Después de la tercera campaña	46,3	-	85,4	-

Cuadro 7  
Coeficiente de aplanamiento y retención recuperable en dos parcelas representativas

### Incidencia de la lámina de escurrida en la rugosidad

La lámina escurrida total se compone de la altura de agua escurrida durante el aguacero y de la altura del agua recuperable (Dr) una vez terminado el aguacero. El cuadro 7 permite poner en evidencia que las retenciones recuperables dependen ante todo de la rugosidad y por lo tanto de la capacidad de la superficie para restituir la lámina de agua residual después del aguacero. Esta es superior cuando la infiltración es menor. Así, es en las parcelas finas cuya porosidad se ha degradado donde se observan los mayores volúmenes retenidos recuperables.

Además, los coeficientes de aplanamiento de la rugosidad que corresponden a los porcentajes de altura comprendidos entre 1 y -1 cm con respecto al promedio, están bien correlacionados con las retenciones recuperables.

### Incidencia de la lámina escurrida en el transporte sólido

La lámina de escurrimiento se acompaña de una carga sólida en suspensión, la turbiedad (Cm), que es proporcional a las alturas de escurrimiento. A fin de apreciar la evolución de este transporte sólido en función de la intensidad del aguacero, la ecuación  $Cm = aI + b$

permite obtener las correlaciones ( $r$ ) entre las cantidades de sedimentos transportados y las características físicas y de cultivo de cada parcela (cuadro 8). Es así como se obtiene la intensidad límite de lluvia ( $I_{lim}$ ) a la que corresponde una turbiedad nula.

Ref. parcelas Preparaciones Tratamientos y pendiente (por ciento)	STFT muy fina Testigo 4,4		SFT Testigo 11,6		SFM fina Maíz 16,4		SGC Cebada 5,8		SGT gruesa Testigo 15,9		SGM Maíz 21,2	
	$I_{lim}$ mm/h	$r$	$I_{lim}$ mm/h	$r$	$I_{lim}$ mm/h	$r$	$I_{lim}$ mm/h	$r$	$I_{lim}$ mm/h	$r$	$I_{lim}$ mm/h	$r$
Primera campana	28,30	637	-	-	-	-	31,70	406	-	-	-	-
Segunda campana	36,76	856	24,81	777	26,66	789	-	-	19,57	590	22,53	889
Tercera campana	-	-	26,40	870	29,17	830	-	-	28,12	794	23,33	954

**Cuadro 8 - Intensidad límite de las lluvias correspondientes a un transporte nulo y coeficiente de correlación de  $C_m = f(I)$**

Los resultados son heterogéneos y aparentemente contradictorios: el transporte sólido se inicia con menores intensidades en las parcelas gruesas que en las finas. Sin embargo, hay que recordar que la exportación total de materiales es la suma de los sedimentos que constituyen la turbiedad y de elementos más gruesos desplazados por reptación debido a la energía del flujo de la lámina escurrida y depositados a la salida de la parcela. Tal reptación es el modo de transporte predominante en todas las parcelas y aumenta la capacidad de la lámina escurrida para transportar los sedimentos. Por otro lado, la amplitud de la pendiente y la capacidad de la lámina escurrida de transportar los sedimentos dependen del tamaño de los agregados, el mismo que puede o no favorecer el fenómeno. El aumento de la pendiente en las parcelas finas incrementa la eficiencia de la lámina escurrida y por lo tanto la exportación de material. El flujo de la lámina escurrida es en cambio menos eficaz en las parcelas gruesas. En ese caso es la amplitud de la pendiente, reducida por la rugosidad de la superficie, la que amplifica el transporte sólido total.

Las medidas de la turbiedad frente a intensidad de la lluvia permitieron observar un aumento del transporte sólido con la intensidad del aguacero. La abrasión del material es más pronunciada en las parcelas finas.

El comportamiento de la parcela gruesa de fuerte pendiente (21 por ciento) cultivada con maíz, caracterizado por una importante infiltración y posteriormente una reducida lámina escurrida, puede explicarse por el efecto de la cobertura vegetal (poco significativo durante este primer año de cultivo) que reduce la susceptibilidad de una partícula a desprenderse de un agregado por el efecto *splash* bajo la influencia de la energía cinética de la lluvia o del flujo de escurrimiento. Además, la fuerte pendiente permite la evacuación del agua infiltrada bajo la forma de un flujo interno.

## CONCLUSIÓN

La caracterización hidrodinámica de los suelos volcánicos endurecidos y rehabilitados permite la comprensión de los fenómenos de escurrimiento y de transporte sólido.

Gracias a la simulación de lluvia, que modeliza ciertos parámetros pluviométricos naturales, se pueden analizar las diferentes fases de la hidrodinámica superficial así como interpretar los comportamientos frente a la imbibición y la infiltración, en función de los diferentes tratamientos de las parcelas.

En tales comportamientos hidrodinámicos influyen directamente la rugosidad de la superficie que caracteriza a los tipos de preparación del suelo y la evolución de la reorganización superficial del suelo.

Así, debido a la roturación y pulverización de la cangahua, una preparación gruesa (de al menos 50 % de agregados de tamaño superior a 5 cm) propicia un índice de rugosidad importante, estable, y una macroporosidad mayor en el tiempo y en el espacio que en el caso de la preparación fina. Esto se traduce en una mayor altura de agua de imbibición hasta la saturación del horizonte de cangahua cultivado, y por lo tanto en un retraso en el inicio del escurrimiento con respecto a la parcela de preparación fina.

La disminución de la infiltración y por lo tanto de los recursos hídricos para las plantas depende directamente de la estructura superficial del suelo y de la pendiente. En la preparación fina, la conductividad hidráulica se degrada rápidamente debido al desmenuzamiento de los agregados, al taponamiento de los poros y a la rápida formación de costras superficiales.

La altura acumulada de lámina escurrida es mayor en las parcelas de preparación fina. El escurrimiento es tanto más importante cuanto menor es la rugosidad de la superficie. Los numerosos obstáculos de la preparación gruesa frenan el flujo y disminuyen las alturas de escurrimiento. Este proceso es más marcado después de la segunda campaña de medidas y se atenúa por el trabajo del suelo al inicio de la tercera campaña. El umbral de la intensidad de las lluvias que desencadenan el transporte de sólidos es en cambio menor o igual en una parcela gruesa que en una parcela fina.

La disminución del fenómeno de transporte sólido y consecuentemente de la erosión posterior a la rehabilitación de la cangahua para la agricultura, es posible mediante una preparación gruesa, en una pendiente inferior al 16 por ciento. En efecto, se ha observado a nivel del metro cuadrado, la existencia de un escurrimiento interno en una pendiente fuerte indica que la disociación estructural entre el horizonte trabajado y la cangahua puede facilitar los fenómenos de solifluxión.

El estudio demuestra que una preparación gruesa permitiría minimizar las pérdidas de suelo por escurrimiento y favorecería la retención del agua necesaria para los cultivos. Sin embargo se deben tomar precauciones al rehabilitar la cangahua en una pendiente inferior al 16 por ciento (acondicionamiento de terrazas) con el fin de evitar todo riesgo de escurrimiento interno en el horizonte subyacente no trabajado.

### Referencias bibliográficas

- ASSELIN, J.; VALENTIN, C., 1978: Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion, dans *Cahiers ORSTOM, Série Hydrologie*, 15, 4, p. 321-347.
- CASENAVE, A.; VALENTIN, C., 1989: *Les états de surface de la zone sabélienne. Influence sur l'infiltration*, ORSTOM, Paris, France, 242 p.
- CUSTODE, E.; DE NONI, G.; TRUJILLO, G.; VIENNOT, M., 1992: La cangahua en el Ecuador: caracterización morfo-edafológica y comportamiento frente a la erosión, 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. 332-346 .

- DE NONI, G.; TRUJILLO, G.; VIENNOT, M., 1986: L'érosion et la conservation des sols en Équateur, dans *Cahiers ORSTOM*, Série Pédologie, XXII, 2, p. 235-245.
- HENIN, S., 1976: *Cours de physique du sol. Tome II : L'eau et le sol - Les propriétés mécaniques - La chaleur et le sol*, ORSTOM Paris et EDITEST Bruxelles, 221 p.
- LAFFORGUE, A., 1977: Inventaire et examen des processus élémentaires de ruissellement et d'infiltration sur parcelles. Application à une exploitation méthodique des données obtenues sous pluies simulées, dans *Cahiers ORSTOM*, Série Hydrologie, 14, 4, p. 299-243.
- LELONG, F; TREVISAN, D., 1992: Influence de la dégradation structurale superficielle sur le ruissellement enregistré sous pluies simulées, dans *Science du Sol*, 2, 1, p. 43-56.
- RAHELARISOA, M. A., 1984: *Influence des techniques culturales sur le comportement hydrodynamique et la susceptibilité à l'érosion de sols limoneux et sableux. Experimentation au champ sous pluies simulées en région centre*, Thèse de Doctorat, Géologie appliquée, (hydrogéologie), Université d'Orléans, 205 p.
- WAINWRIGHT, J.; ABRAHAMS, A.; PARSONS, A., 1995: A Simulation Study of the Role of Raindrop Erosion in the Formation of Desert Pavements, in *Earth Surface Processes and Landforms*, 20, p. 277-291.