



**HAL**  
open science

# Variables de suelos determinantes del escurrimiento y la erosión en un sector de la Sierra Madre Occidental

D. Viramontes, Luc Descroix, Arnaud Bollery

► **To cite this version:**

D. Viramontes, Luc Descroix, Arnaud Bollery. Variables de suelos determinantes del escurrimiento y la erosión en un sector de la Sierra Madre Occidental. Ingeniería hidráulica en México, 2006. ird-02153551

**HAL Id: ird-02153551**

**<https://ird.hal.science/ird-02153551>**

Submitted on 12 Jun 2019

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# VARIABLES DE SUELOS DETERMINANTES DEL ESCURRIMIENTO Y LA EROSIÓN EN UN SECTOR DE LA SIERRA MADRE OCCIDENTAL

David Viramontes

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Luc Descroix

Institut de Recherche pour le Développement, Nigeria

Arnaud Bollery

Laboratoire d'Etudes des Transferts en Hydrologie et Environnement, Francia

*El área de estudio es una zona de pastizal de la cuenca alta del río Nazas en la Sierra Madre Occidental presenta serios problemas de deforestación y sobrepastoreo. Utilizando parcelas experimentales y pruebas de infiltrometría se determinó el funcionamiento de las variables del suelo en la formación del escurrimiento superficial y erosión hídrica (vegetación, localización en la vertiente, pendiente del terreno, estado de superficie y características del suelo). Los análisis estadísticos empleados demuestran que los estados de la superficie de los suelos pueden explicar el comportamiento hidrológico superficial y la erosión. Las zonas encostradas o endurecidas presentan una conductividad hidráulica menor y tienen condiciones favorables a la formación de escorrentías y a la pérdida de suelo. Los suelos pedregosos, generalmente localizados en terrenos con pendientes medias y fuertes, tienen una conductividad hidráulica mayor, que disminuye los escurrimientos superficiales. La deforestación y el sobrepastoreo incrementan las superficies de suelos endurecidos y pedregosos, esto manifiesta un cambio en el comportamiento hidrodinámico. Este fenómeno podría explicar el aumento de los escurrimientos de crecida de los ríos de la zona. Por otro lado, se observa que la textura (sin considerar la pedregosidad), la pendiente del terreno y la poca vegetación herbácea no resultaron ser variables estadísticamente significativas en la formación de los escurrimientos superficiales de la zona. Esto demuestra la importancia de identificar variables determinantes de la relación lluvia – escurrimiento – erosión antes de utilizar directamente modelos de predicción.*

**Palabras clave:** Sierra Madre Occidental, escurrimiento superficial, erosión hídrica, conductividad hidráulica, encostramiento, pedregosidad, textura, pendiente, vegetación herbácea.

## Introducción

El movimiento del agua en el suelo se realiza de acuerdo con sus características hidráulicas (capacidad de almacenamiento, conductividad hidráulica, entre otras), que tienen relaciones, a su vez, con sus características físicas (estructura, textura, porosidad, contenido de materia orgánica, etcétera). Todas estas características pueden ser fácilmente modificadas por las actividades humanas (sobrepastoreo, labranza, etcétera). Esto significa una modificación de la respuesta hidráulica de los suelos.

Muchos estudios han demostrado la importancia de la Sierra Madre Occidental como fuente de agua para el centro-oeste y norte de México, así como por la producción ganadera y la explotación del bosque que se da en la región (Descroix *et al.*, 1994; González y Descroix, 2000). En esta cadena de montañas se genera la mayor parte de los escurrimientos que llegan al río Bravo, provenientes de la cuenca del río Conchos. Esto muestra su importancia hidrológica y estratégica nacional. Sin embargo, de acuerdo con los estudios realizados en la cuenca alta del Nazas de esta zona montañosa, el estado de degradación debido al sobrepastoreo y la

deforestación es grave (Poulenard *et al.*, 1996; Rodríguez, 1997; Barral y Anaya, 1995; Descroix y Nouvelot, 1997; Viramontes y Descroix, 2000). Podemos sintetizar este problema en dos aspectos importantes: en primer lugar, existe una carga animal de dos a cuatro veces superior a la capacidad de carga recomendada para la zona (Barral y Anaya, 1995); en segundo lugar, la demanda de madera de las fábricas de las ciudades es superior a la capacidad de producción de los bosques de la sierra. Esta demanda de recursos naturales superior a la oferta real genera una fuerte presión en los pastizales y bosques de la sierra. Por otro lado, las lluvias torrenciales (con intensidades máximas que pueden llegar hasta 140 mm/h) pueden provocar graves efectos en los suelos. La principal forma de erosión de esta zona es laminar y los efectos visibles en el paisaje muestran una evolución dirigida hacia la pérdida y cambios de la vegetación, y disminución de la profundidad de los suelos, aumento de zonas pedregosas en las vertientes, así como a la formación de zonas encostradas y endurecidas en las partes planas de poca o nula pendiente (Viramontes, 1995; Viramontes *et al.*, 2002). Las preguntas obligadas son las siguientes: ¿Cuáles son las variables del suelo responsables directamente del escurrimiento y la erosión hídrica? En este contexto de sobreexplotación de recursos, ¿cuál será la evolución espacial y temporal de la influencia de estas variables en la relación lluvia – escurrimiento – erosión?

El presente artículo pretende evidenciar las variables y procesos responsables del escurrimiento y erosión de un sector montañoso de la cuenca alta del Nazas en la Sierra Madre Occidental. Por ello, no se utilizan modelos de predicción de erosión, sino que, a partir de mediciones, se busca poner en evidencia los procesos explicativos de la formación de escurrimientos superficiales y erosión hídrica.

**Metodología**

En este trabajo se analizan los resultados de mediciones experimentales en parcelas de escurrimiento y erosión hídrica. Los sitios de las parcelas fueron seleccionados con diferentes condiciones de litología, pendientes, suelos, estados de la superficie del suelo y vegetación. En un primer momento, se analizan datos de parcelas de 50 m<sup>2</sup> (5 por 10 m). Considerando que existe una gran variabilidad espacial en el comportamiento hidráulico de estos suelos, que ya antes ha sido puesto en evidencia por Descroix *et al.* (2001), se analizan también datos de escurrimiento y erosión de pequeñas parcelas de 1 m<sup>2</sup>; esto permite aislar e identificar variables específicas del suelo *in situ*, así como tener un mayor número de par-

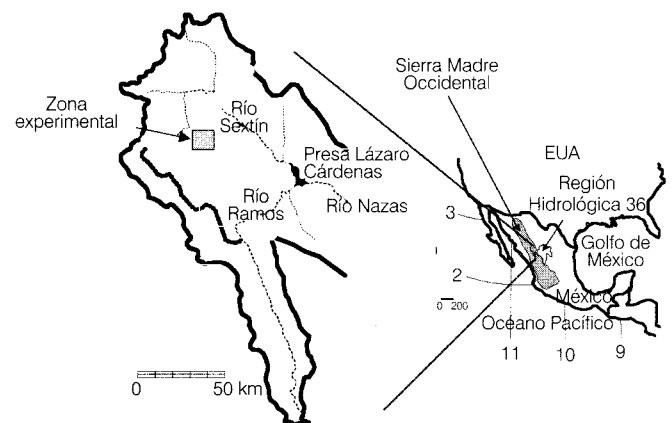
celas para la realización de análisis estadísticos más confiables.

El área de estudio se localiza en una zona de pastoreo del ejido Boleras, en el municipio de Guanaceví, Durango, en la cuenca alta del río Nazas en la Sierra Madre Occidental (ilustración 1). En este sector fueron seleccionados dos sitios experimentales en función de sus condiciones de litología y suelos: “El Aguaje” (sobre ignimbritas riolíticas) y “La Manga” (en tobas y conglomerados). El sistema de medición fue directo con reservorios de recepción total de las aguas escurridas. Los datos de escurrimiento y el muestreo para determinar erosión fueron tomados después de cada evento de lluvia. Las mediciones se llevaron a cabo en las temporadas de lluvia de 1996 y 1997 (10 parcelas de 50 m<sup>2</sup>) y 1998 (14 parcelas de 1 m<sup>2</sup>). Por razones de seguridad y de mayor confiabilidad en los datos, las parcelas en cada uno de los sitios experimentales se localizaron en una misma vertiente y relativamente cerca unas de otras. Se contó también con dos pluviómetros y un pluviógrafo en cada uno de los dos sitios experimentales.

A partir de diferentes análisis en campo y laboratorio, se realizó una caracterización física de los suelos de cada una de las parcelas. Con base en bibliografía especializada (Casenave y Valentin, 1989; Poesen y Lavee, 1994, etcétera), también se tomaron en cuenta variables de la superficie del suelo. Todas estas variables y sus métodos analíticos se encuentran en el cuadro 1.

Posteriormente, con el fin de dar mayor confiabilidad a los resultados, se realizaron pruebas de infiltrometría en diferentes sitios del área de estudio. Se utilizó un infiltrómetro de discos (TRIMS: Triple Ring Infiltrometer at Multiple Suction) (Vandervaere, 1995 y Vandervaere *et al.*, 1997). El infiltrómetro se compone de una base circu-

**Ilustración 1. Localización de la zona experimental en la cuenca alta del río Nazas.**



**Cuadro 1. Métodos y variables utilizadas en la caracterización de las parcelas.**

Variable	Unidad	Método utilizado
Coefficiente de escurrimiento ( <i>CE</i> )	%	Lote de escurrimiento (50 y 1 m <sup>2</sup> )
Taza de erosión ( <i>ERO</i> )	g/m <sup>2</sup>	Lote de escurrimiento (50 y 1 m <sup>2</sup> )
Pendiente ( <i>PEN</i> )	grados	Clisímetro
Vegetación herbácea ( <i>VEG</i> )	%	Cuadrante de puntos
Mantillo ( <i>LIT</i> )	%	Cuadrante de puntos
Encostramiento ( <i>COS</i> )	%	Cuadrante de puntos
Piedras de la superficie ( <i>PIES</i> )	%	Cuadrante de puntos
Densidad aparente ( <i>DA</i> )	g/cm <sup>3</sup>	Met. directo (piscina) * incluye gravas y piedras
Densidad real ( <i>DR</i> )	%	Picnómetro $(DR - DAS)/DR * 100$
Espacio poroso ( <i>EP</i> )	%	* <i>DAS</i> Densidad aparente del suelo medido con cilindro
Piedras ( <i>PIE</i> )	%	Tamiz
Arena ( <i>ARE</i> )	%	Met. Bouyoucos
Arcilla ( <i>ARC</i> )	%	Met. Bouyoucos
Limo ( <i>LIM</i> )	%	Met. Bouyoucos

lar (la cual entra en contacto con el suelo y sobre la que descansa un depósito de alimentación) y un sistema de despresurización. Un vaso de Mariote permite calibrar la depresión de manera continua sin detener el flujo. El método utilizado fue el multipotencial, el cual permite efectuar medidas sucesivas del flujo a diferentes potenciales o presiones negativas impuestas. Las pruebas se desarrollaron en 66 sitios con diferentes características del suelo y se cubrió una superficie de 400 km<sup>2</sup> (25° 35' a 25° 45' de latitud norte, y 105° 35' a 105° 45' de longitud oeste). Todas estas pruebas permitieron también hacer una generalización de los resultados de las parcelas.

## Resultados

En los cuadros 2 y 3 se presentan las matrices de resultados de la caracterización de las parcelas. En el caso de las parcelas de 50 m<sup>2</sup>, los valores de escurrimiento y erosión corresponden al promedio anual de las dos estaciones de lluvia registradas (1996 y 1997). Las pequeñas parcelas de 1 m<sup>2</sup> muestran los resultados del año 1998. Para los análisis de suelo, en campo y laboratorio, se tomaron muestras en el interior de las parcelas después de los periodos de mediciones. Considerando que los muestreos en las parcelas de 1 m<sup>2</sup> incluían una buena porción de la parcela, se puede decir que éstas son más representativas de las condiciones del suelo que las de 50 m<sup>2</sup>. Sin embargo, las parcelas de mayor tamaño representan mejor las condiciones de escurrimiento superficial e incluyen procesos de erosión más completos.

Por ello, el tener estos dos grupos de parcelas permite una visualización más completa de los efectos de la lluvia.

En el cuadro 4 se muestran los resultados anuales promedio de escurrimiento y erosión en clases de parcelas diferenciadas por sus características generales. En las parcelas de 50 m<sup>2</sup> se diferencian los grupos por substrato litológico (que corresponde al sitio experimental), presencia de árboles y grado de pendiente. En estas parcelas la vegetación herbácea bajo los árboles corresponde a plantas anuales. Las parcelitas de 1 m<sup>2</sup> no se localizaron bajo los árboles, pues el interés principal era evidenciar el impacto de las gotas de lluvia en diferentes formas de superficie del suelo. Por ello, los grupos de estas parcelitas no tienen diferenciada la presencia de árboles, pero se cuenta con su localización en la vertiente. Se observa que tanto las parcelas grandes como las pequeñas tienen resultados similares en las comparaciones de grupos de parcelas por litología y pendiente. Según las observaciones, las zonas de ignimbritas riolíticas son más sensibles al escurrimiento y erosión que las zonas de tobas y conglomerados; además, los valores más elevados de escurrimiento y erosión se encuentran en las pendientes que oscilan entre 10 y 20%. Las parcelas en pendientes fuertes tienen coeficientes de escurrimiento y tasas de erosión menores. Los valores obtenidos en las parcelas de 50 m<sup>2</sup> denotan también que la presencia de árboles disminuye los escurrimientos y la erosión en aproximadamente 50%. Se observa que las parcelitas situadas en lo alto y medio de la vertiente tie-

**Cuadro 2. Matriz de caracterización de las parcelas de 50 m<sup>2</sup>.**

Parcelas en tobas	Unidad	P11	P12	P13	P14	P15
Lámina escurrida ( <i>LE</i> )*	(mm)	40.64	47.72	68.63	54.49	30.98
Desviación estándar de la <i>LE</i>		6.07	7.58	9.93	8.23	5.96
Coefficiente de escurrimiento ( <i>CE</i> )*	(%)	14.30	16.79	24.15	19.17	13.89
Erosión ( <i>ERO</i> )	(g/m <sup>2</sup> )	975.5	672.9	2,385.5	1,691.2	732.4
Pendiente ( <i>PEN</i> )	(%)	25.78	17.11	16.22	28.89	12.89
Cobertura arbórea ( <i>CA</i> )	(%)	39.4	63.2	0.0	0.0	5.4
Piedras de la superficie ( <i>PIES</i> )	(%)	27.9	5.1	6.5	32.7	0.0
Encostramiento ( <i>COS</i> )	(%)	7.0	25.3	40.9	0.0	2.6
Mantillo ( <i>LIT</i> )	(%)	24.4	14.1	38.7	29.1	27.0
Herbáceas ( <i>VEG</i> )	(%)	23.3	41.4	20.4	16.4	40.0
Densidad aparente ( <i>DA</i> )	(g/cm <sup>3</sup> )	1.86	1.68	1.54	1.87	1.62
Densidad real ( <i>DR</i> )	(g/cm <sup>3</sup> )	2.28	2.47	2.43	2.25	2.47
Espacio poroso ( <i>EP</i> )	(%)	18.4	32.0	36.6	16.9	34.4
Piedras ( <i>PIE</i> )	(%)	68.5	25.5	26.1	62.6	17.2
Arena ( <i>ARE</i> )	(%)	61.28	72.13	73.83	67.13	77.25
Limo ( <i>LIM</i> )	(%)	19.55	17.65	15.49	12.98	13.31
Arcilla ( <i>ARC</i> )	(%)	14.82	13.07	12.24	15.40	11.72

Parcelas en ignimbritas	Unidad	P21	P22	P23	P24	P25
Lámina escurrida	(mm)	38.06	184.92	67.14	54.81	67.71
Desviación estándar de la <i>LE</i>		1.96	8.88	3.31	2.91	3.44
Coefficiente de escurrimiento ( <i>CE</i> )	(%)	8.94	43.46	15.78	12.88	15.91
Erosión ( <i>ERO</i> )	(g/m <sup>2</sup> )	949.8	4,705.9	2,697.4	514.6	569.6
Pendiente ( <i>PEN</i> )	(%)	16.89	17.78	31.33	34.22	23.33
Cobertura arbórea ( <i>CA</i> )	(%)	65.3	0.0	60.3	33.2	27.7
Piedras de la superficie ( <i>PIES</i> )	(%)	5.9	0.9	7.3	10.6	15.2
Encostramiento ( <i>COS</i> )	(%)	4.9	43.6	6.2	12.9	6.3
Mantillo ( <i>LIT</i> )	(%)	39.2	26.4	53.1	25.9	32.1
Herbáceas ( <i>VEG</i> )	(%)	10.8	28.2	6.3	9.4	35.7
Densidad aparente ( <i>DA</i> )	(g/cm <sup>3</sup> )	1.62	1.60	1.81	1.54	1.49
Densidad real ( <i>DR</i> )	(g/cm <sup>3</sup> )	2.22	2.10	2.13	2.08	2.14
Espacio poroso ( <i>EP</i> )	(%)	27.0	23.8	15.0	26.0	30.4
Piedras ( <i>PIE</i> )	(%)	31.5	29.5	11.9	29.5	38.1
Arena ( <i>ARE</i> )	(%)	36.01	68.08	55.80	38.35	51.61
Limo ( <i>LIM</i> )	(%)	21.85	10.96	53.15	29.86	29.35
Arcilla ( <i>ARC</i> )	(%)	37.45	20.20	18.18	35.03	15.50

\* Los valores de lámina escurrida y coeficiente de escurrimiento son promedios anuales.

nen condiciones similares de escurrimiento y sensibilidad a la erosión; en cambio, las zonas de baja vertiente tienen los coeficientes de escurrimiento más bajos, pero las tasas de erosión más elevadas.

Utilizando los valores de las diferentes variables medidas en las parcelas, se obtuvieron correlaciones y se realizó un análisis factorial (*ACP*) en cada una de las matrices de datos. Estos análisis estadísticos permiten po-

ner en evidencia la cercanía de las relaciones (positivas o negativas) que puedan existir entre las diferentes variables utilizadas. Los coeficientes de correlación obtenidos entre las diferentes variables con el coeficiente de escurrimiento y tasa de erosión se encuentran en el cuadro 5. Se observa que son pocas las variables que tienen correlaciones con el escurrimiento y erosión de las parcelas. En las parcelas mayores, solamente el en-

Cuadro 3. Matriz de caracterización de las parcelas de 1m<sup>2</sup>.

Parcelas en tobas	Unidad	MP11	MP12	MP13	MP14	MP15	MP16	MP17
Lámina escurrida ( <i>LE</i> )	(mm)	123.74	114.57	76.90	68.11	72.09	61.33	87.48
Desviación estándar de la <i>LE</i>		7.31	6.67	4.73	3.62	3.55	2.80	5.45
Coefficiente de escurrimiento ( <i>CE</i> )	(%)	45.38	42.02	28.2	24.97	26.44	22.55	32.08
Erosión ( <i>ERO</i> )	(g/m <sup>2</sup> )	254.15	371.98	221.08	234.46	419.26	145.00*	146.79
Pendiente ( <i>PEN</i> )	(%)	22.67	15.78	19.9	27.33	45.56	13.78	9.5
Localización en la vertiente		Alto	Alto	Medio	Medio	Bajo	Bajo	Bajo
Piedras de la superficie ( <i>PIES</i> )	(%)	21.19	2	22.12	33.35	52.67	4.59	9
Encostramiento ( <i>COS</i> )	(%)	24.58	53.84	32.92	11.1	15.28	31.21	43
Mantillo ( <i>LIT</i> )	(%)	28.82	12.17	15.66	38.29	12.62	41.35	21
Herbáceas ( <i>VEG</i> )	(%)	19.49	24	21.35	10.12	7.99	21.95	23
Densidad aparente ( <i>DA</i> )	(g/cm <sup>3</sup> )	1.685	1.607	1.724	1.905	1.739	1.546	1.623
Densidad real ( <i>DR</i> )	(g/cm <sup>3</sup> )	2.1	2.4	2.34	2.38	2.47	2.38	2.59
Espacio poroso ( <i>EP</i> )	(%)	19.8	33	26.3	20	29.6	35	37.3
Piedras ( <i>PIEI</i> )	(%)	39.29	37.29	61.89	76.04	62.49	50.57	48.18
Arena ( <i>ARE</i> )	(%)	70	72	70.5	70	68	74.5	76
Limo ( <i>LIM</i> )	(%)	11.5	16	14	18	18	14	16
Arcilla ( <i>ARC</i> )	(%)	18.5	12	15.5	12	14	11.5	8

Parcelas en Ignimbritas	Unidad	MP21	MP22	MP23	MP24	MP25	MP26	MP27
Lámina escurrida ( <i>LE</i> )	(mm)	66.87	129.80	163.82	145.70	142.21	146.06	102.49
Desviación estándar de la <i>LE</i>		5.47	9.57	10.64	9.51	9.42	10.14	6.94
Coefficiente de escurrimiento ( <i>CE</i> )	(%)	20.87	41.91	51.66	45.7	44.6	48.53	33.1
Erosión ( <i>ERO</i> )	(g/m <sup>2</sup> )	35.76	314.96	314.49	684.77	254.92	355.73	279.89
Pendiente ( <i>PEN</i> )	(%)	9.11	19.5	18.89	16.89	18.22	5.78	25.11
Localización en la vertiente		Alto	Medio	Medio	Bajo	Medio	Alto	Alto
Piedras de la superficie ( <i>PIES</i> )	(%)	4.93	5.09	10.17	17.77	3.52	9.1	22.93
Encostramiento ( <i>COS</i> )	(%)	11.73	40.68	48.99	41.61	35	56.81	16.98
Mantillo ( <i>LIT</i> )	(%)	57.77	17.8	18.63	11.96	33.99	19.24	38.11
Herbáceas ( <i>VEG</i> )	(%)	23.54	16.95	12.02	22.85	25	14.05	14.49
Densidad aparente ( <i>DA</i> )	(g/cm <sup>3</sup> )	1.733	1.492	1.503	1.798	1.511	1.483	1.49
Densidad real ( <i>DR</i> )	(g/cm <sup>3</sup> )	2.09	2.2	2.12	2.1	2.29	2.09	2.25
Espacio poroso ( <i>EP</i> )	(%)	17.1	32.2	29.1	14.4	34	29	33.8
Piedras ( <i>PIEI</i> )	(%)	49.42	48.67	43.92	62.11	41.45	38.48	55.28
Arena ( <i>ARE</i> )	(%)	49	40	62	53	66	52	39
Limo ( <i>LIM</i> )	(%)	24	24	18	24	18	20	18
Arcilla ( <i>ARC</i> )	(%)	27	36	20	23	16	28	43

costramiento tiene una correlación positiva con el escurrimiento (*CE* y *COS* con 0.78) y la erosión (*ERO* y *COS* con 0.63). En las parcelas menores se observa también una relación positiva entre el coeficiente de escurrimiento y el encostramiento (*CE* y *COS* con 0.72), pero una ligera relación negativa entre los escurrimientos y las piedras de la matriz del suelo (*CE* y *PIEI* con -0.58). La tasa de erosión en estas parcelas tiene a su vez una relación inversa con el mantillo de la superficie del suelo (*ERO* y *LIT* con -0.71). Por otro lado, la correlación entre

el coeficiente de escurrimiento (*CE*) y la tasa de erosión (*ERO*) tiene un valor mayor en las parcelas grandes (0.88) que en las parcelas pequeñas (0.55). Si bien las tasas de erosión son mayores en las parcelas pequeñas, aparentemente existe un proceso de arrastre de sedimentos en las parcelas de 50 m<sup>2</sup> más visible que en las parcelas de 1 m<sup>2</sup>.

Las observaciones anteriores son manifiestas también en los análisis de componentes principales (*ACP*) que se presentan en las ilustraciones 2 y 3. De acuerdo

**Cuadro 4. Resumen de resultados de escurrimiento y erosión por grupo de parcelas.**

Parcelas	Factor		Número de parcelas	Coefficiente de escurrimiento (%)	Erosión (g/m <sup>2</sup> )
50 m <sup>2</sup>	Litología	Tobas	5	17.66	1,291.5
		Ignimbritas	5	19.394	1,887.46
	Cobertura arbórea	Con árboles	6	14.1	1,063.3
		Sin árboles	4	25.1675	2,378.75
	Pendiente	Media (> 10 < 20%)	5	21.446	1,889.3
		Fuerte (> 20%)	5	15.608	1,289.66
1 m <sup>2</sup>	Litología	Tobas	7	31.7	256.1
		Ignimbritas	7	40.9	320.1
	Localización en la vertiente	Cresta	5	38.0	259.5
		Bajada superior	5	38.3	268.0
		Bajada inferior	4	31.7	349.0
	Pendiente	Débil (< 10%)	3	33.8	179.4
		Media (> 10 < 20%)	7	39.5	329.6
		Fuerte (> 20%)	4	32.5	296.9

**Cuadro 5. Correlaciones de las variables del suelo con el coeficiente de escurrimiento (CE) y tasa de erosión (ERO) en los dos grupos de parcelas.**

Variables	Parcelas de 50 m <sup>2</sup>		Parcelas de 1 m <sup>2</sup>	
	CE	ERO	CE	ERO
CE	1.00		1.00	
ERO	<b>0.88</b>	1.00	<b>0.55</b>	1.00
PEN	-0.23	-0.09	-0.22	0.28
PIES	-0.23	-0.25	-0.32	0.27
COS	<b>0.78</b>	<b>0.63</b>	<b>0.72</b>	0.36
LIT	-0.12	0.30	-0.53	<b>-0.71</b>
VEG	0.18	-0.18	0.02	-0.18
DA	-0.14	0.08	-0.46	0.12
DR	-0.18	-0.30	-0.50	-0.22
EP	-0.01	-0.27	0.03	-0.25
PIEI	-0.06	-0.18	<b>-0.58</b>	0.14
ARE	0.45	0.30	-0.20	-0.20
LIM	-0.37	-0.06	0.09	0.31
ARC	-0.25	-0.13	0.21	0.13

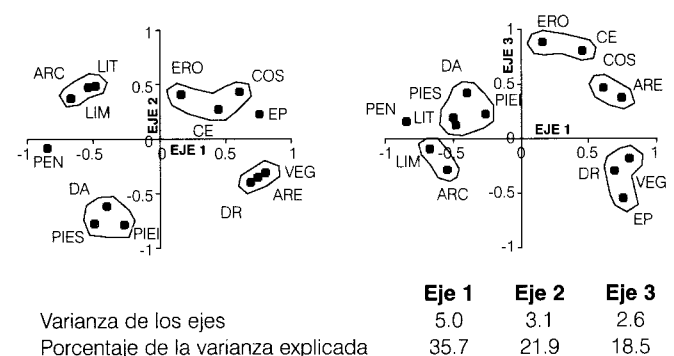
con los valores de los cuadros adjuntos a las ilustraciones, los tres primeros componentes del ACP pueden explicar 76.1 y 73.7% de la varianza entre los grupos de parcelas de 50 y 1 m<sup>2</sup>.

En los ejes 1 y 2 del análisis de componentes de las parcelas de 50 m<sup>2</sup> se observa un grupo formado por las variables escurrimiento (CE), erosión (ERO) y encostramiento (COS); en contraposición, se localizan las variables de pedregosidad de la superficie (PIES) y de la ma-

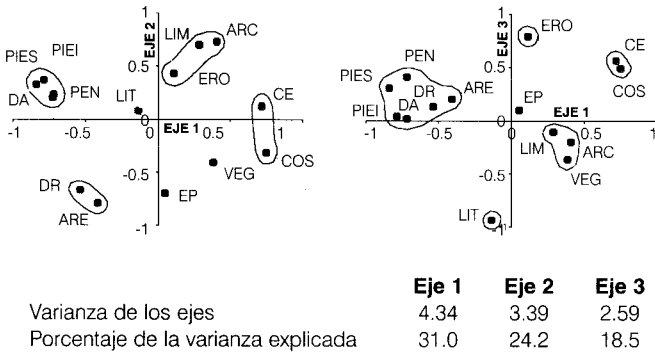
triz del suelo (PIEI). Es decir, los encostramientos del suelo tienen condiciones favorables para la formación de escurrimientos y erosión; en cambio, los elementos pedregosos tienen condiciones contrarias. Las variables mantillo (LIT), arcilla (ARC) y limo (LIM) se encuentran asociadas y tienen en sentido opuesto al grupo formado por la vegetación herbácea (VEG), arena (ARE) y densidad real (DR). El espacio de variables de los ejes 1 y 3 de estas mismas parcelas presentan una asociación del escurrimiento (CE) y erosión (ERO) con una cercanía relativa del encostramiento y sin contraposición. Los otros grupos formados en esta gráfica por el resto de las variables son relativamente similares a los grupos formados por los ejes 1 y 2.

Los resultados del análisis de componentes principales en las parcelas pequeñas exponen de una manera

**Ilustración 2. Espacio de variables del ACP: ejes 1 y 2, y ejes 1 y 3 de características de los suelos de las parcelas de 50 m<sup>2</sup>.**

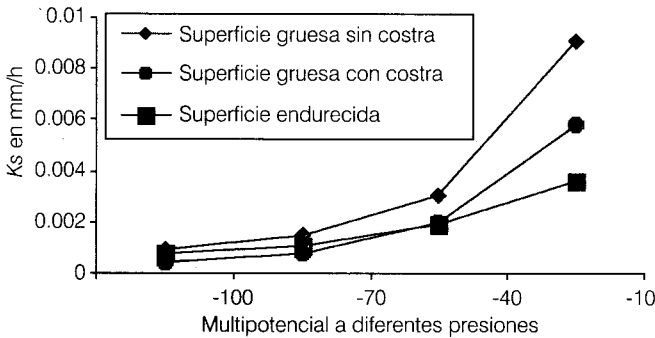


**Ilustración 3. Espacio de variables del ACP: ejes 1 y 2, y ejes 1 y 3 de características de los suelos de las parcelas de 1 m<sup>2</sup>.**



más clara las relaciones entre las variables del suelo y el coeficiente de escurrimiento y erosión (ilustración 3). En la primera gráfica, formada por los ejes 1 y 2, se puede observar lo siguiente: el primer conjunto está formado por el coeficiente de escurrimiento (CE) y el encostramiento (COS). En el sector opuesto, se encuentra el grupo formado por los parámetros piedras de la superficie (PIES y PIEI), densidad aparente (DA) y pendiente (PEN). Es decir, los suelos encostrados son de fácil escurrimiento; en cambio, los suelos pedregosos, localizados en pendientes fuertes, tienen altas densidades aparentes y son permeables. La erosión (ERO), el limo (LIM) y la arcilla (ARC) forman un tercer conjunto, en contraposición al cuarto conjunto formado

**Ilustración 4. Comparación de la conductividad hidráulica por clase de estado de superficie del suelo.**



Superficie	Ks en mm/s	
	Promedio	Desv. std.
Gruesa sin costra	0.0089	0.0051
Gruesa con costra	0.0058	0.0033
Endurecida	0.0036	0.0015

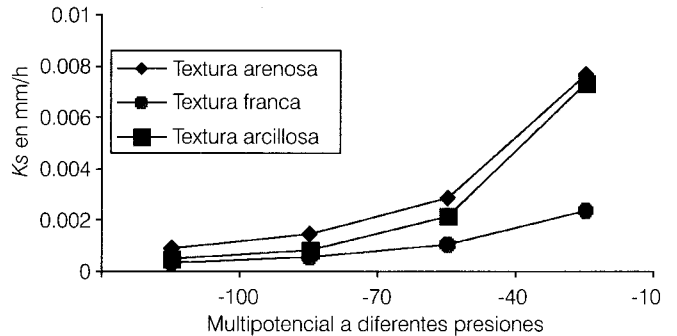
Diferenciación de medias por la prueba de Student a 85% es positiva en los tres grupos de valores.

por la densidad real (DR) y la arena (ARE). Es decir, los suelos más erodables se encuentran en las zonas de textura fina, y los suelos de textura gruesa resultan menos productores de sedimentos. Por otro lado, la segunda gráfica, formada por los ejes 1 y 3, presenta condiciones similares a la primera en cuanto al coeficiente de escurrimiento. Las variables CE y COS forman el primer conjunto, en contraposición al grupo formado por las variables PIES, PIEI, DA, PEN e incluyendo a las variables DR y ARE. En cambio, el conjunto formado por la tasa de erosión (ERO) es antagónico al grupo del mantillo (LIT). Esto confirma el carácter protector del mantillo. La distancia entre el coeficiente de escurrimiento y la tasa de erosión puede explicarse porque en esta escala (1 m<sup>2</sup>) el efecto del arrastre de sedimentos por el escurrimiento no es aún evidente como en las parcelas de 50 m<sup>2</sup>. En cambio, en la escala de un m<sup>2</sup> sí puede ser posible reconocer la fragilidad del suelo debido al efecto de la lluvia.

En ambos análisis de componentes principales (ACP) para los dos grupos de parcelas, ninguna de las cuatro gráficas pudo reconocer alguna asociación del escurrimiento y erosión con la pendiente (PEN), la textura (ARE, LIM y ARC) y la vegetación herbácea (VEG).

Los resultados de la conductividad hidráulica de cada uno de los 66 sitios distribuidos en el área de estudio fueron clasificados por clase textural y estado de superficie del suelo. Posteriormente, se realizó una prueba de comparación de medias (Students) para poder saber

**Ilustración 5. Comparación de la conductividad hidráulica por clase textural del suelo.**



Textura	Ks en mm/s	
	Promedio	Desv. std.
Arenosa	0.0077	0.0043
Franca	0.0024	0.0010
Arcillosa	0.0073	0.0040

Diferenciación de medias por la prueba de Student a 85% es positiva entre los grupos de valores de textura arenosa y franca. No diferencia los grupos de textura arcillosa y arenosa.



si las diferencias entre los promedios de cada grupo eran estadísticamente significativas. Los resultados muestran que hubo diferencias significativas entre los diversos estados de la superficie del suelo (ilustración 4). De esta manera, los suelos que presentaron una conductividad hidráulica mayor fueron aquéllos que presentaron superficies pedregosas; los suelos gravosos con presencia de costra tuvieron valores medios, y los suelos con una superficie endurecida presentaron los más bajos valores de conductividad. En cambio, los resultados ordenados por clase textural (ilustración 5) no presentaron diferencias significativas según la prueba estadística de comparación de medias. Aparentemente, la estructura superficial del suelo resultó ser un factor determinante en la conductividad hidráulica; más importante aún que la textura de la matriz del suelo. Estos resultados coinciden entonces con las observaciones registradas en las parcelas experimentales.

## Discusión

De acuerdo con los resultados de varios autores que han trabajado en parcelas experimentales en diferentes partes del mundo (Fristch, 1990; Scott Munro y Huang, 1997; Croke *et al.*, 1999, entre otros), se constata que los árboles y el mantillo constituyen reguladores del escurrimiento y una pantalla protectora contra la erosión. Además, el mantillo impide la formación de una costra superficial y genera una buena estructura del suelo que facilita la infiltración (Viramontes *et al.*, 2002).

Según los resultados presentados, la primera variable de importancia del suelo que explica el orden de escurrimiento es el encostramiento. Se trata de una variable que regula la infiltración a partir de la superficie del suelo. Esto coincide con diferentes trabajos realizados en diferentes zonas áridas sobre la influencia de las costras superficiales del suelo (Cassenave y Valentin, 1989; Janeau y Ruiz, 1992; Janeau *et al.*, 1999; Viramontes *et al.*, 2002). La presencia de una costra en superficie o de un suelo endurecido favorece el escurrimiento. El área de estudio no es una zona árida. Sin embargo, según los resultados obtenidos, los suelos encostrados o endurecidos de las partes planas con poca o nula pendiente tienen un comportamiento aparentemente similar a los desiertos y semidesiertos.

La pedregosidad del terreno ocupa el segundo lugar en orden de importancia en el comportamiento del escurrimiento superficial y la erosión. Esta variable puede tener una función ambivalente: las piedras impiden la infiltración directa de las gotas de lluvia, mas también pueden aumentar los valores de infiltración si ellas toman la energía cinética de la lluvia (Poesen y Lavee,

1994; Valentin, 1994). En la zona de estudio, las piedras de la superficie del suelo absorben el impacto de las gotas y permiten una disminución del efecto *splash*. Además, las zonas pedregosas tienen, en general, una macroporosidad importante, que permite la infiltración y la conductividad hidráulica.

En forma contraria a la esperada, la vegetación herbácea no fue un agente explicativo del escurrimiento y la erosión hídrica. En comparación con el impacto de las costras del suelo y las piedras, el efecto permeable y antierosivo de la vegetación herbácea no fue suficientemente significativo en los análisis estadísticos. Las gramíneas de esta zona de estudio no generan una permeabilidad importante en el suelo. En muchas ocasiones, las gramíneas se localizan en forma de mosaico en suelos encostrados, donde el único sitio permeable se localiza directamente en el macollo vegetal (Viramontes *et al.*, 2002).

De igual manera, la pendiente del terreno y los elementos que forman la textura del suelo no presentaron una relación evidente con los coeficientes de escurrimiento y tasas de erosión. Por un lado, las zonas de mayor pendiente no son las mayores generadoras de escurrimientos, pues presentan suelos pedregosos permeables. Por otro lado, el efecto de la textura del suelo puede ser anulado por el efecto de su estructura. Es decir, en la escala de trabajo, la distribución en cantidad porcentual de arenas, limos y gravas tiene un efecto nulo frente al arreglo espacial de las mismas partículas del suelo (formación de costras superficiales).

## Conclusiones

En este trabajo se exponen los efectos de las variables del suelo en la formación de escurrimientos superficiales y la erosión hídrica en una zona de la cuenca alta del Nazas en la Sierra Madre Occidental. Los elementos de la superficie del suelo (árboles, mantillo, costras y piedras) son las variables que regulan los escurrimientos y la erosión de esta zona. Estas variables son visibles en el terreno y pueden ser empleadas como indicadoras del paisaje para decir si un sitio tiene o no características favorables al escurrimiento y la erosión.

La evolución del paisaje debida a la sobreexplotación de los recursos naturales del área de estudio (desarrollo de zonas encostradas y pedregosas) puede originar cambios en el comportamiento hidrodinámico de los suelos. Aparentemente, los suelos encostrados o endurecidos tienen un funcionamiento similar a los de las zonas áridas (Cassenave y Valentin, 1989; Vandervaere, 1995; Vandervaere *et al.*, 1997; Janeau y Ruiz, 1992; Tarin, 1992; Viramontes, 1992; Delhoume, 1995; Janeau

et al., 1999). Las zonas pedregosas, localizadas por lo general en pendientes, resultan ser áreas de infiltración preferencial, pero con poca capacidad de retención de humedad debido a que las partículas finas del suelo se han perdido a causa de la erosión (Viramontes, 1995). La consecuencia directa del desmonte y del sobrepastoreo de esta área es la tendencia a la pérdida de humedad de los suelos o aridez edáfica. Este fenómeno podría explicar el aumento de los escurrimientos de crecida de los ríos del área de estudio demostrado en otros trabajos (Viramontes y Descroix, 2002; Viramontes y Descroix, 2003).

Otro aspecto importante es que se constata que algunos factores que se toman en cuenta en los modelos clásicos de estimación del escurrimiento y erosión no fueron determinantes en esta zona de estudio. Tal es el caso de la vegetación herbácea en suelos encostrados, la pendiente en terrenos pedregosos y la textura del suelo. En este caso, los métodos de cálculo de los escurrimientos sin utilizar mediciones objetivas directas pudieran no ser aplicables en el área de estudio. El método racional (presentado en SARH, 1977, y Becerra, 1999, entre otros) y el método de la curva numérica o número de escurrimiento de la USDA (Martínez, 1985; Mintegui, 1993, entre otros) no coinciden con el comportamiento presentado por los escurrimientos de esta zona. Además, según la ecuación universal de pérdida de suelos (EUPS), los factores *S* (grado de pendiente), *K* (erodabilidad del suelo) y *C* (uso del suelo y vegetación) parecen no tener sentido si son calculados de la manera tradicional (utilizando la inclinación de la pendiente para *S*, la textura para *K* y la vegetación herbácea para *C*). Por ello, es evidente la necesidad de considerar un análisis de factores y procesos determinantes del escurrimiento y la erosión antes de avanzar en la utilización de modelos de predicción sin mediciones objetivas.

Recibido: 13/09/2004

Aprobado: 15/04/2005

## Referencias

- BARRAL, H. y ANAYA, E. *La ganadería y su manejo en relación con los recursos agua y pastizal en la zona semi-árida de México*. Gómez Palacio, México: ORSTOM-INIFAP, 1995, 78 pp.
- BECERRA-MORENO, A. *Escorrentía, erosión y conservación de suelos*. Universidad Autónoma de Chapingo, 1999, 376 p.
- CASENAVE, A. y VALENTIN, C. *Les états de surface de la zone Sahélienne. Influence sur l'infiltration*. Paris: ORSTOM, 1989, 229 pp.
- CROKE, J., HAIRSINE, P. y FOGARTY, P. Runoff generation and re-distribution in logged eucalyptus forests, south-eastern Australia. *Journal of Hydrology*. Núm. 216, 1999, pp. 56-77.
- DELHOUME, J.P. *Fonctionnement Hydro-pédologique d'une toposéquence de sols en milieu aride. (Réserve de la biosphère de Mapimi, Nord-Mexique)*. Thèse, Université de Poitiers. 1995, 295 pp.
- DESCROIX, L., ESTRADA, A.J. Y BOUVIER, C. Hidrometría. *Estudio de los factores que influyen los escurrimientos y el uso del agua en la Región Hidrológica 36*. Gómez Palacio, México: INIFAP-CENID RASPA y ORSTOM-DEC, 1994, pp. 63-117.
- DESCROIX, L. y NOUVELOT, J.F. *Escurrecimiento y erosión en la Sierra Madre Occidental*. Gómez Palacio, México: ORSTOM-INIFAP, 1997, 50 pp.
- DESCROIX, L., VIRAMONTES, D., VAUCLIN, M., GONZALEZ-BARRIOS, J.L. y ESTEVES, M. Influence of surface features and vegetation on runoff and soil erosion in the western Sierra Madre (Durango, North West Mexico). *CATENA*. Vol. 43, núm. 2, 2001, pp. 115 – 135.
- FRITSCH, J.M. *Les effets du défrichement de la forêt amazonienne et la mise en culture sur l'hydrologie de petits bassins versants*. Thèse Université de Montpellier II, 1990, 390 pp.
- GONZALEZ-BARRIOS, J.L. y DESCROIX, L. Bilan et perspectives de la ressource en eau dans le bassin du Nazas-Aguanaval (Nord-Mexique). *Revue Géographie Alpine*. Núm. 88, 2000, pp. 115-128.
- JANEAU, J-L. y RUIZ DE ESPARZA, R. Cartographie des états de surface d'une toposéquence représentative du bassin versant de San Ignacio. *Actas del Seminario Mapimi*. Instituto de Ecología-ORSTOM-CEMCA, 1992, pp.161-176.
- JANEAU, J.L., MAUCHAMP, A. y TARIN, G. The soil surface characteristics of vegetation stripes in Northern Mexico and their influences on the system hydrodynamics. *CATENA*. Núm. 37, 1999, pp. 165-173.
- MARTÍNEZ, M. *Estimación de escurrimiento en cuencas pequeñas*. Chapingo, México: Universidad Autónoma de Chapingo (Departamento de Suelos), 1985.
- MINTEGUI, J.A. *Métodos para la estimación de los efectos torrenciales en cuencas hidrográficas*. Escuela Técnica Superior de Montes, Fundación Conde del Valle de Salazar. 1993, 88 pp.
- POESEN, J. y LAVÉE, H. Rock fragments in top soils: significance and processes. *CATENA*. Vol. 23, núm. 1-2, 1994, pp. 1-28.
- POULENARD, J., DESCROIX, L. y JANEAU, J.L. Surpâturage et formation de terrassettes sur les versants de la Sierra Madre Occidentale (Nord-Ouest de Mexique). *Revue Géographie Alpine*. Núm. 2, 1996, pp. 77-86.
- RODRIGUEZ, M.G. *Determinación de la vegetación en la Sierra Madre Occidental para la calibración de imágenes satélite*. ECF-UJED, Durango, México, 1997, 60 pp.

- SARH. *Manual de conservación del suelo y del agua*. Chapingo, México: Colegio de Postgraduados, Chapingo, 1977, 584 p.
- SCOTT-MUNRO, D. y HUANG, L.J., Rainfall, evaporation and runoff responses to hillslope aspects in the Shenchong Basin. *CATENA*. Núm. 29, 1997, pp. 131-144.
- TARIN, G. *Caracterización hidrodinámica del suelo a nivel de una formación en mogote, utilizando un simulador de lluvia en la Reserva de la Biósfera de Mapimí, Durango*. Tesis profesional, Biología. Torreón, México: ECB-UAC, 1992, 125 p.
- VALENTIN, CH., Surface sealing as affected by various rock fragment cover in West Africa. *CATENA*. Vol. 23, núm. 1-2, 1994, pp. 87-98.
- VANDERVAERE, J.P. *Caractérisation hydrodynamique du sol in situ par infiltrométrie à disques: analyse critique des régimes pseudo-permanents, méthodes transitoires et cas des sols encroûtés*. Thèse Université. Grenoble : Joseph Fourier, 1995, 329 pp.
- VANDERVAERE, J.P., PEUGEOT, C., VAUCLIN, M., ANGULO-JARAMILLO, R. y LEBEL, T. Estimating hydraulic conductivity of crusted soils using disc infiltrimeters and minitensiometers. *Journal of Hydrology*. Vol. 188-189, núm. 1-4, 1997, pp. 203-223.
- VIRAMONTES, D. Redistribución espacial del agua en el paisaje. Escurrimiento y erosión hídrica a través de una toposecuencia. *Actas del Seminario Internacional Mapimí*. México, D.F.: Instituto de Ecología A.C.–ORSTOM–CEMCA, 1992, pp. 143–159.
- VIRAMONTES, D. *Caracterización de los suelos y la vegetación en la parte alta de la cuenca del Nazas*. Gómez Palacio, México: ORSTOM-INIFAP, 1995, 45 pp.
- VIRAMONTES, D. y DESCROIX, L. Dégradation progressive du milieu sur le bilan hydrique des bassins versants dans la Sierra Madre Occidentale. *Revue Géographie Alpine*. Vol. 88, núm. 2, 2000, pp. 27-41.
- VIRAMONTES, D. y DESCROIX, L. Modifications physiques du milieu et conséquences sur le comportement hydrologique des cours d'eau de la Sierra Madre Occidentale (Mexique). *Revue des Sciences de l'Eau*. Vol 15, núm. 2, 2002, pp. 493-513.
- VIRAMONTES, D., DESCROIX, L., BOLLERY, A. y POULENARD, J. Comportement hydro-érosif des sols de la Sierra Madre Occidentale: processus hydrologiques et évolution d'un milieu soumis à la surexploitation. *Géomorphologie: relief, processus, environnement*. Núm. 3, 2002, pp. 239-252.
- VIRAMONTES, D. y DESCROIX, L. Changes in the surface water hydrologic characteristics of an endoreic basin of northern Mexico from 1970 to 1998. *Hydrological Processes Journal*. Vol. 17, núm. 7, 2003.

### Abstract

VIRAMONTES, D., DESCROIX, L. & BOLLERY, A. Determining variables of soils in runoff and erosion in a sector of the Western Sierra Madre. Hydraulic engineering in Mexico (in Spanish). Vol. XXI, no. 1, January-March, 2006, pp. 73-83.

The area of interest is a rangeland in the Upper Nazas Basin at the Western Sierra Madre with serious problems of overgrazing and deforestation. The role of the variables in runoff and erosion (vegetation, slope, surface features and analytic soils) was determined using experimental plots and infiltrometry tests. Statistical analyses show that the soils surface features can explain the surface hydrological behavior and erosion of soils. The crusted zones present a smaller hydraulic conductivity, and have favorable conditions for runoff and sediment production. The stony soils, located in moderate and high slopes, have a greater hydraulic conductivity which slower the runoff. Deforestation and overgrazing increase the surfaces of crusted and stony soils; that means a change in the hydro-dynamic behavior. This phenomenon could explain the increase of the peak flows on rivers. It is also observed that the texture (without considering the stones), the slope gradient and the herbaceous vegetation are not the main variables involved in the runoff and erosion processes in this site. This study shows the importance of identifying the related variables between rainfall – runoff and erosion before using any prediction model directly.

**Keywords:** Western Sierra Madre, runoff, rain erosion, hydraulic conductivity, crusted soils, stony soils, texture, slope, herbaceous vegetation.

### Dirección institucional de los autores:

David Viramontes

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA),  
Paseo Cuauhnáhuac 8532, Jiutepec, Morelos,  
C.P. 62550,  
teléfono (52) (777) 329 3600, ext. 154,  
davidv@tlaloc.imta.mx

Luc Descroix

Institut de Recherche pour le Développement (IRD),  
B.P. 11416, Niamey, República de Niger,  
teléfono: (227) 75 2610,  
descroix@ird.ne

Arnaud Bollery

Laboratoire d'Etudes des Transferts en Hydrologie et Environnement (LTHE),  
1023, rue de la Piscine, Domaine Universitaire,  
BP 53, 38041 Grenoble, Cedex 9, France,  
teléfono: (33) (0) 476 82 50 00,  
bollery.arnaud@lemel.fr