

# DINÁMICAS EVOLUTIVAS DE SUELOS EN ATUM PAMPA, SIERRAS PAMPEANAS, CÓRDOBA, ARGENTINA

EVOLUTIVE SOIL DYNAMICS OF ATUM PAMPA, SIERRAS PAMPEANAS,  
CÓRDOBA, ARGENTINA

ANÍBAL MANZUR

Dirección de Recursos Naturales Renovables  
Parque Gral. San Martín s/n , 550 Mendoza

## RESUMEN

Atum Pampa se ubica en las Sierras Grandes de Córdoba, a 1000 m s.m. Los procesos pedogenéticos dominantes en el área son: melanización, calcificación-descalcificación, eluviación-iluviación y alcalinización. Los horizontes superficiales contienen dos tipos de humus: uno es un mull con dominio de  $\text{Ca}^{++}$  intercambiable y el otro es un mull con  $\text{CO}_3\text{Ca}$  libre. Los calcretes maduros han sido originados por procesos cíclicos de sedimentación, pedogénesis y erosión, asociados con alternancias climáticas en el Cuaternario. La intensidad de los procesos de iluviación están a menudo relacionados con la humedad del suelo o la disponibilidad de agua y muestran una clara dependencia con la morfología en pendiente. Los horizontes alcalinos están asociados a pendientes cóncavas. El catión  $\text{Na}^+$  se origina por la meteorización de los feldespatos. Los horizontes nátricos y argílicos y el material parental loésico contribuyen a la ocurrencia de erosión en túnel. A consecuencia de este proceso 5% del área esta cubierta por cárcavas.

## SUMMARY

*Atum Pampa is a high plateau of the Sierras Grandes, Córdoba Province, located at an altitude of 1000 m a s l. Dominant pedogenetic processes are: melanization, calcification-decalcification, eluviation-illuviation and alkalinitation. The soil surface horizons contain two types of humus: mull with  $\text{Ca}^{++}$  exchange dominant and mull with free  $\text{CaCO}_3$ . Mature calcretes have been originated from cyclic processes of sedimentation, pedogenesis and erosion, associated with climatic alternances of the upper Quaternary. The intensity of illuviation process are mostly related to soil moisture or water availability and show a clear dependence on slope morphology. The alkaline horizons are associated to concave slopes. The  $\text{Na}^+$  cation is originated from feldspars weathering. Natric and argilic horizons and loessic parent materials contribute to the occurrence of piping erosion. As a consequence of this process, 5% of the area is covered by gullies.*

## INTRODUCCIÓN

Si bien el ser humano percibe por lo general a los suelos como uno de los componentes más estables del ambiente,

éstos en realidad son sistemas complejos y abiertos, continuamente modificados por flujos de energía y materia de diferente intensidad (Smeck *et al.*, 1983; Johnson y Watson Stegner, 1987; Ibáñez *et al.*, 1991). La comprensión del carácter de sistema abierto de los suelos es indispensable para poder interpretar no solo su génesis y evolución, sino también las posibles respuestas a diferentes tipos de uso (Bouma, 1993).

La constante interacción con el medio puede generar en los suelos dinámicas evolutivas progresivas que llevan a un desarrollo del perfil, favoreciendo la formación de horizontes o dinámicas regresivas que provocan un rejuvenecimiento o simplificación del perfil de suelo, lo que se traduce en una pérdida de horizontes:  $S = (P,R)$ , donde S: suelo; P: pedogénesis progresiva; y R: pedogénesis regresiva, (Johnson y Watson Stegner, 1987).

Atum Pampa es una pampa de altura de las Sierras Grandes de la Provincia de Córdoba, con condiciones fisiográficas muy heterogéneas. Los suelos presentan variadas características y grados de desarrollo, estrechamente vinculadas a la morfología del paisaje. Se encuentran también cárcavas de grandes dimensiones, que afectan aproximadamente un 5% del área total.

El objetivo planteado en el presente trabajo es realizar un análisis de los factores y procesos que favorecen tanto la evolución, como la degradación de los suelos presentes en el área. Por otra parte se plantea como hipótesis que en parte los procesos de degradación de suelos son una consecuencia del grado evolutivo general del sistema bajo las condiciones climáticas actuales.

## MATERIAL Y MÉTODO

### Área de estudio

Atum Pampa se ubica en el macizo de Sierras Grandes de la Provincia de Córdoba a una altitud de 1000 m s.m. y ocupa una superficie aproximada de 65 km<sup>2</sup>.

La litología del basamento cristalino está compuesta mayoritariamente por gneis tonalítico biotítico y migmatitas cordieríticas interdigitadas con gneis común (Gordillo y Lencinas, 1979; Martino, *et al.*, 1994).

El relieve local es suavemente ondulado, lo que ha favorecido la depositación de sedimentos eólicos y el desarrollo de suelos. En el área se han reconocido diferentes facies sedimentarias: un nivel inferior, compuesto por sedimentos limosos pardo rojizos y correlacionado tentativamente con la Fm. Pampiano; un nivel de facies de calcretes de diferente grado de desarrollo y por último un nivel de sedimentos loésicos de edad aproximada Pleistoceno Superior-Holoceno Inferior. Estos sedimentos se correlacionan tentativamente con la Fm La Invernada, definida por Cantú (1992) en el sur de la Pcia. de Córdoba.

Los suelos dominantes de la región tienen como sus materiales parentales a estos sedimentos loésicos y su desarrollo habría comenzado durante el Hypsithermal u Optimun Climaticun durante el Holoceno inferior a medio. Los minerales más abundantes en la fracción arena muy fina son las plagioclasas (anortita 30-35, 60%), feldspatos alcalinos (30%), vidrio volcánico (20%), cuarzo (15%), biotita (5%) y la fracción arcilla predominante es la illita (Manzur, 1995; 1996).

Las precipitaciones en el área son cercanas a los 1000 mm anuales (INTA-M.A.G.- R.R.-I.Fo.Na., 1990). La distribución obedece a un régimen de tipo monzónico, con veranos lluviosos e inviernos secos. La temperatura media anual, calculada a partir de isothermas regionales, es inferior a 10°C.

El régimen de humedad de los suelos ha sido definido como Údico y el térmico transicional entre Mésico y Térmico.

Los suelos fueron descriptos de acuerdo a Etcheverhe (1976) y clasificados según Soil Survey Staff (1994). Se muestrearon 9 perfiles de suelos considerados representativos según diferentes situaciones espaciales. Las metodologías para los análisis físico- químicos son las clásicas señaladas en la bibliografía general (Jackson, 1964, U.S.D.A 1972) (Tabla 1, Figura 2). Se realizaron observaciones en corte delgado (30m) sobre muestras de calcretes, observándose microestructuras, texturas y componentes petrográficos.

Se aplicó el test de comparación de medias L.S.D. (Pennock *et al.*, 1987; Webster y Oliver 1990), con el objeto de comparar la variabilidad espacial de la profundidad del carbonato de calcio, espesor del horizonte B, color del horizonte A (value) y pH del horizonte subsuperficial (inferior al A), en función de la morfología del paisaje, contemplando tanto la forma de la (pendiente, plana, convexa o cóncava), y la posición (media loma, media loma alta, media loma baja).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En los suelos se destacan la presencia de

horizontes superficiales ricos en materia orgánica (mólicos) y subsuperficiales enriquecidos en arcillas (argílicos), horizontes con alto contenido de sodio de intercambio (nátricos) y horizontes con abundante carbonato de calcio (cálcicos y petrocálcicos) (Tabla 1).

### **Características de los horizontes humíferos**

Los horizontes humíferos de los suelos dominantes del área se caracterizan por tener un porcentaje moderadamente alto de materia orgánica (4-6%), un color pardo muy oscuro; un porcentaje en saturación en bases superior al 70% y una estructura de bloques y/o granular (Tabla 1).

Pueden distinguirse en los suelos 2 tipos principales de humus (Tabla 2):

1) *mull con complejo de cambio con Ca<sup>++</sup> dominante*, la relación C/N es cercana a 10, el pH es ligeramente ácido y no hay presencia de carbonato de calcio (perfiles 1, 2, 6, 7 y 8). Este tipo de humus predomina en sectores del paisaje donde los suelos muestran mayor desarrollo, como cimas y pendientes planas y pendientes cóncavas (Figura 2).

2) *mull carbonatados*: se caracterizan por la presencia de carbonatos libres y un pH ligeramente alcalino (perfiles 3, 4, 5, 9); es más estable que el anterior debido a que el carbonato de calcio forma películas protectoras sobre los coloides limitando su maduración y favoreciendo la formación de horizontes espesos, muy oscuros y con estructura granular, (Duchaufour, 1984; Buol *et al.*, 1989). Este tipo de humus se asocia directamente a la presencia de horizontes ricos en carbonato de calcio cerca de superficie.

Tabla1. Características físico-químicas de los suelos

Table 1. Physic-chemical characteristics of soils

HOR.	PROF. mues. (cm)	A.MG. 1-2mm	A.G. 500- 1000m	A.M. 250- 500m	A.F. 100- 250m	A.MF. 50- 100m	L.T. 2-50m	L.F. 2-20m	ARC. 2m	GRA. %	EQ.H. %	M.O %	C.O. %
<b>PERFIL N°1: Argiudol típico, familia franca fina, illítica, méxico-térmico</b>													
A	0-19	-	-	-	6.5	1.6	64.8	23.4	24.4	-	27.3	5.9	3.3
Bt	19-49	-	-	-	0.2	6.8	61.6	19.7	30.4	-	29.4	2.1	1.2
BC	49-88	-	-	-	0.8	6.5	70.1	19.3	19.9	-	23.9	-	-
Ck	88+	-	-	1.5	4.1	11.1	71.7	25.8	8.8	-	21.6	-	-
<b>PERFIL N°2: Argiudol thapto petrocálcico, arcillosa fina, illítica, méxico-térmico</b>													
A	0-20	0.1	0.3	0.1	2.2	5.3	65.1	20.4	27.2	1.3	32.49	4.1	2.4
Btl	20-41	0.5	0.6	0.3	1.0	3.5	51.9	18.3	42.3	0.5	32.65	3.1	1.7
Bt2	41-60	0.4	0.3	0.3	1.5	4.7	43.6	15.2	47.8	-	41.42	-	-
2Ck	75+	0.8	0.9	0.5	1.2	12.9	63.5	35.6	20.5	0.4	22.4	-	-
<b>PERFIL N°3: Argiudol cálcico, limosa fina, illítica, méxico-térmico</b>													
A	0-18	-	-	-	4.5	15.9	57.6	20.4	21.9	-	28.2	5.94	3.3
Bt	18-40	-	-	-	2.1	12.0	59.3	21.3	26.7	-	29.5	3.8	2.7
BCK	40-63	-	-	-	1.7	6.9	63.7	22.7	34.9	-	25.5	-	-
Ck	63+	-	-	-	4.2	6.2	67.8	24.5	21.8	-	23.4	-	-
<b>PERFIL N°4: Paleudol lítico, franca, somera, illítica, méxico-térmico</b>													
A	0-19	4.1	19.7	6.2	14.1	6.8	35.5	-	21.7	1.7	24.2	5.7	3.1
2kml	19-26	1.7	6.9	5.1	7.7	4.8	57.8	-	16.7	0.3	30.5	2.40	1.4
2k2	26-43	0.7	4.6	3.3	6.7	8.8	59.5	-	16.4	-	33.6	-	-
<b>PERFIL N°5: Hapludol thapto cálcico, franca fina, calcárea, illítica, méxico-térmico</b>													
A	0-21	9.2	10.5	4.2	5.7	6.1	37.3	12.3	23.4	3.0	20.9	4.2	2.5
B	21-45	7.0	6.8	3.3	8.6	5.7	40.9	15.4	26.3	2.2	21.7	2.5	1.43
2BCK	45-70	3,5	2,1	3,9	6,6	4,9	55,8	24,8	23,2	-	33,3	-	-
2Ck	70+	0,3	1,4	0,2	3,1	5,0	68,8	28,7	20,7	-	44,5	-	-
<b>PERFIL N°6: Natrudalf mólico, limosa fina, illítica, méxico-térmico</b>													
A	0-17	1.1	5.0	1.7	7.6	7.8	60.1	21.9	15.3	0.7	23.8	4.2	2.4
Bn1	17-38	-	-	0.7	7.0	12.1	45.7	17.6	32.6	-	29.6	2.9	-
Bn2	38-53	-	-	4.6	3.8	3.8	52.3	25.3	33.1	-	33.1	-	-
Bn3	53-75	1.9	2.5	1.0	3.6	4.2	63.1	21.3	25.9	-	25.6	-	-
BC	75-97	-	1.3	1.1	0.7	10.1	64.1	16.7	22.1	-	23.2	-	-
Ck	97+	-	4.1	3.0	3.0	4.9	65.7	18.4	17.4	-	22.9	-	-
<b>PERFIL N°7: Natrudald glóssico, arcillosa fina, ullítica, méxico-térmico</b>													
A	0-18	0.2	0.9	1.5	2.1	7.0	62.2	34.1	26.2	0.1	25.7	3.2	2.3
E	18-25	1.2	1.4	1.8	5.3	68.6	35.7	22.4	0.3	23.3	2.2	1.6	0.18
EB	25-29	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bn1	29-58	0.1	1.8	0.8	0.2	7.0	39.0	33.1	51.0	0.2	41.4	4.2	1.6
Bn2	58-78	0.2	0.8	1.2	1.5	7.0	49.8	13.2	39.5	0.1	32.6	-	-
BC1	78-97	0.3	0.3	0.4	1.4	8.5	67.9	14.1	21.0	-	21.2	-	-
Ck	97+	0.8	0.9	0.5	1.2	12.9	65.5	17.3	18.2	0.2	20.4	-	-
<b>PERFIL N°8: Argiudol lítico, franca gruesa, somera, illítica, méxico-térmico</b>													
A	0-22	6.2	11.5	7.6	11.7	7.3	32.3	10.2	23.4	3.1	22.1	5.2	2.8
Bt	22-45	4.0	7.4	4.7	13.6	5.5	38.0	12.4	28.8	2.9	23.5	3.0	1.76
2BC	45-56	8.1	9.6	10.4	13.9	8.8	36.7	-	12.5	7.5	15.3	-	-
R	56+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>PERFIL N°9: Calciudol típico, esquelética franca, calcárea, illítica, méxico-térmico</b>													
A	0-17	8.1	7.1	6.1	15.1	10.8	33.5	14.2	20.3	4.2	22.9	4.9	2.8
2ARk	17-27	10.4	10.2	9.3	14.3	14.5	28.0	13.6	13.3	30	17.3	-	-
3k	27+	1.7	6.1	4.2	7.3	5.5	44.4	16.6	18.6	0.4	30.9	-	-

N. %	C/N	COCa %	pH H <sub>2</sub> O 1:2.5	pH pasta	pH- INCIK 1:2.5	Cationes Cambio cmol/kg <sup>-1</sup>						S	T	S/T%	Na+ Int. %T
						Ca++	Mg++	Na+	K+	H+					
0.3	10	-	6.1	6.0	5.0	15.0	0.7	0.3	0.8	3.0	16.8	19.8	85	-	
0.12	10	-	6.4	6.2	5.4	16.5	1.4	0.4	0.8	1.8	19.1	20.9	91	-	
-	-	-	7.2	7.1	6.2	16.3	1.1	0.3	0.6	-	18.3	18.3	100	-	
-	-	9.2	7.9	7.6	7.0	-	-	0.5	0.6	-	-	-	-	-	
0.24	10	-	7.1	6.4	6.1	19.1	0.9	0.4	0.8	1.3	21.5	22.5	96	-	
0.17	10	-	7.0	6.6	6.2	22.8	1.6	0.4	0.6	2.0	25.4	26.0	93	-	
-	-	-	7.1	6.6	6.4	23.3	0.8	0.4	0.6	1.2	25.1	26.0	96	-	
-	-	33.4	8.3	8.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
0.26	12.7	0.5	7.6	7.4	7.0	-	-	0.3	1.0	-	-	-	-	-	
0.27	10	0.4	7.8	7.4	7.3	-	-	0.2	0.5	-	-	-	-	-	
-	-	19.8	8.1	7.8	7.7	-	-	0.2	0.6	-	-	-	-	-	
-	-	14.8	8.4	7.9	7.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
0.3	10	2.3	7.9	7.6	7.1	-	-	0.3	1.1	1.2	-	17.8	-	-	
-	-	54.3	8.3	7.9	7.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
-	-	47.5	8.4	7.9	7.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
0.28	8.9	1.3	8.2	7.8	-	-	-	0.3	1.1	-	-	12.8	-	-	
-	-	0.7	8.0	7.6	-	-	-	0.2	1.0	-	-	13.3	-	-	
-	-	14.1	8.5	7.8	-	-	-	0.2	1.0	-	-	12.5	-	-	
-	-	12.6	8.5	7.8	-	-	-	0.3	1.7	-	-	11.4	-	-	
0.24	10	-	6.9	7.2	6.5	17.8	1.5	0.7	0.5	2.1	20.5	22.6	90	-	
-	-	-	8.0	7.8	6.7	20.4	2.4	5.0	0.5	-	-	28.3	94	15.6	
-	-	1.2	8.2	7.9	6.9	-	-	5.4	0.5	-	-	29.3	-	18.4	
-	-	-	8.0	7.7	6.9	14.9	1.6	5.4	0.7	-	-	22.6	100	23.9	
-	-	-	7.9	7.6	6.6	13.2	0.4	5.9	0.7	-	-	20.6	100	28.6	
-	-	6.2	8.7	8.0	7.0	-	-	4.4	0.7	-	-	19.4	-	22.7	
0.17	7.6	-	6.7	7.0	6.4	16.9	1.6	0.6	0.6	2.3	19.7	22.0	89	-	
8.9	-	7.0	7.3	6.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
0.16	10	-	8.1	7.9	6.7	20.2	3.0	4.3	0.3	-	27.6	-	100	15.6	
-	-	-	8.1	7.8	6.9	17.0	2.3	4.5	0.3	-	24.1	-	100	18.6	
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
-	-	7.9	8.5	8.2	-	-	-	4.4	0.4	-	19.1	-	-	23	
0.28	10	-	6.2	5.8	5.0	15.6	1.5	0.3	1.1	2.2	18.5	20.7	89	-	
-	-	-	6.7	6.0	5.3	16.8	1.6	0.4	1.3	2.2	20.1	22.3	90	-	
-	-	-	6.3	5.8	5.1	11.5	0.7	0.3	0.5	1.3	13.0	14.3	90	-	
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
0.28	10	0.7	7.6	7.3	6.8	-	-	0.3	1.0	2.5	-	20.8	87	-	
-	-	4.2	8.2	7.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
-	-	19.6	8.5	8.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

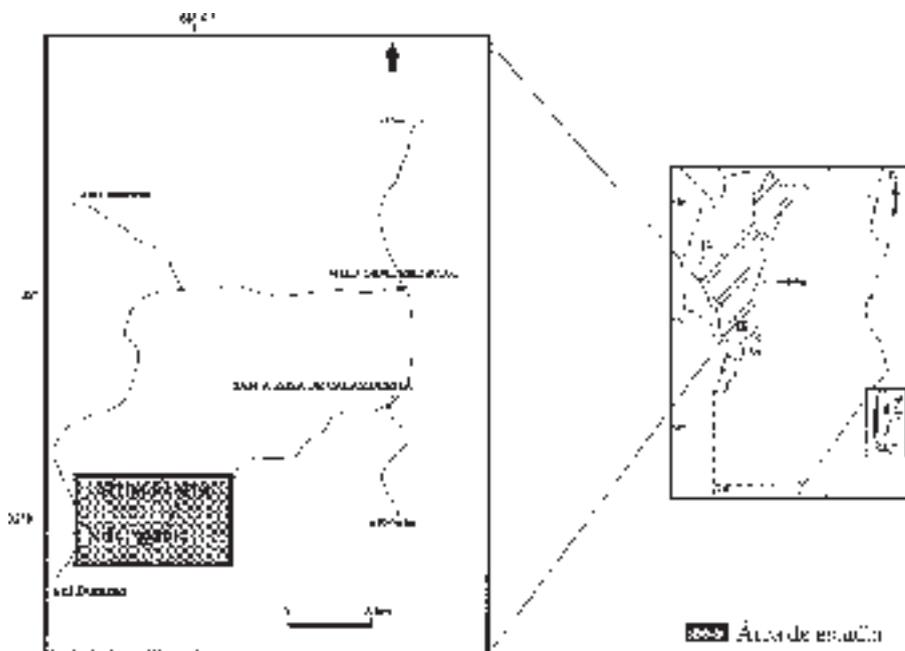


Figura 1. Ubicación del área de estudio  
 Figure 1. Location of the study area

Tabla 2. Características de los horizontes superficiales  
 Table 2. *Superficial horizons characteristics*

N° Perfil	% M.O.	Rel. C/N	Color Munsell* (en húmedo)	% Ca <sup>++</sup> Int.	% CO Ca	pH H <sub>2</sub> O 1:2.5	Tipo de humus
1	5.8	19	19YR3/2	76	-	6.1	1
2	3.8	7	10YR3/3	86	-	6.9	1
3	5.9	12.7	10YR3/2	-	0.5	7.6	2
4	5.9	10	10YR2/2	-	2.5	7.9	2
5	4.2	8.9	10YR2/2	-	1.3	8.2	2
6	4.1	10	10YR4/2	87	-	6.9	1
7	2.2	7.6	10YR4/2	86	-	6.7	1
8	5.2	10	10YR3/2	75	-	6.2	1
9	4.9	10	10YR2/1	-	0.7	7.6	2

A partir del análisis del color Munsell del suelo y específicamente a partir del aumento en los valores en los grises (value), pueden detectarse condiciones

marcadas de lavado vinculadas a diferentes condiciones hidrológicas de los suelos (Hall 1983; Hall y Olson, 1991). El test de comparación de medias (L.S.D., Figura

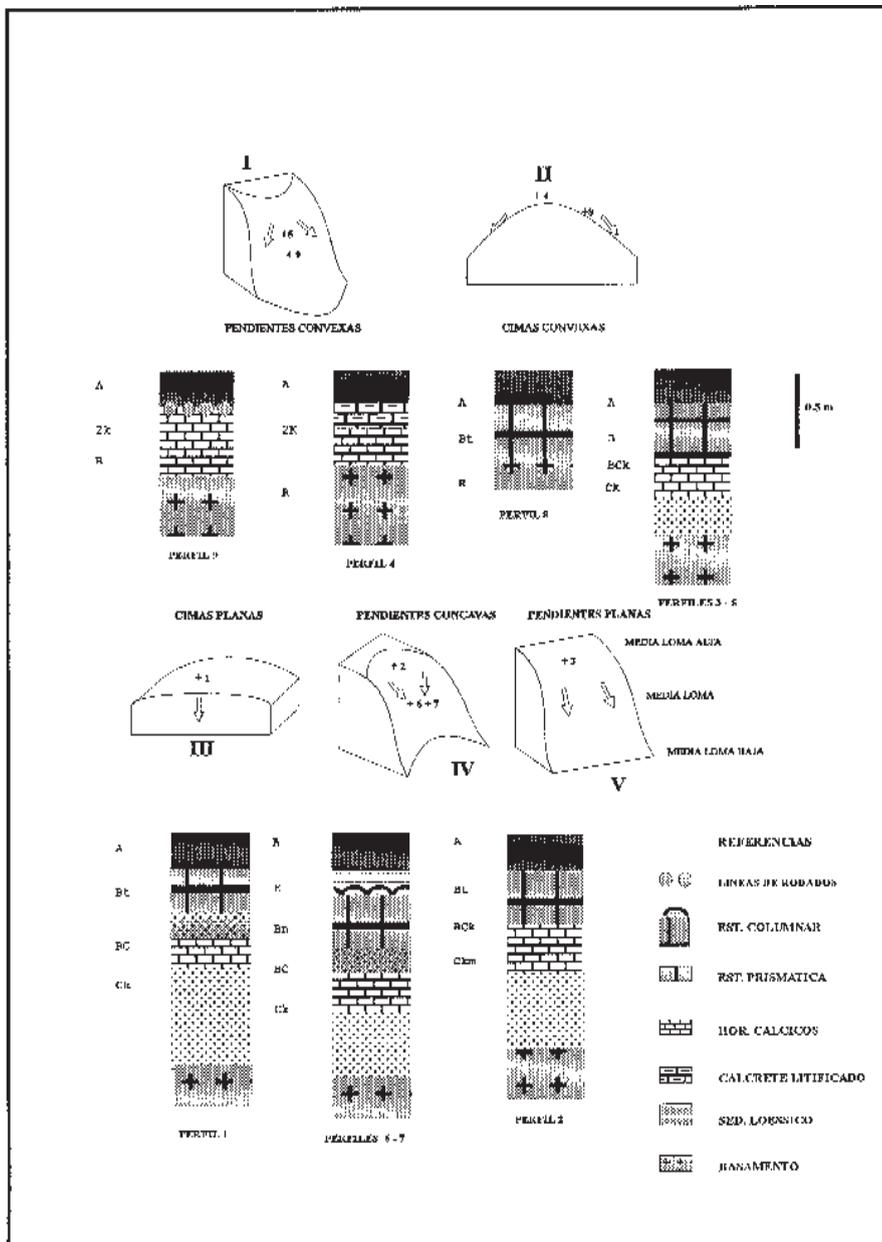


Figure 2. Tipos de suelos y morfologías asociadas  
 Figure 2. Soil types and associated morphologies

3) para diferentes situaciones espaciales está señalando mayores valores (más claros) en sectores del paisaje con flujos hídricos convergentes (pendientes cóncavas), vinculados a su vez a la presencia de suelos sódicos. En pendientes convexas donde dominan los humus carbonatados el value medio es menor (más oscuro).

vas), vinculados a su vez a la presencia de suelos sódicos. En pendientes convexas donde dominan los humus carbonatados el value medio es menor (más oscuro).

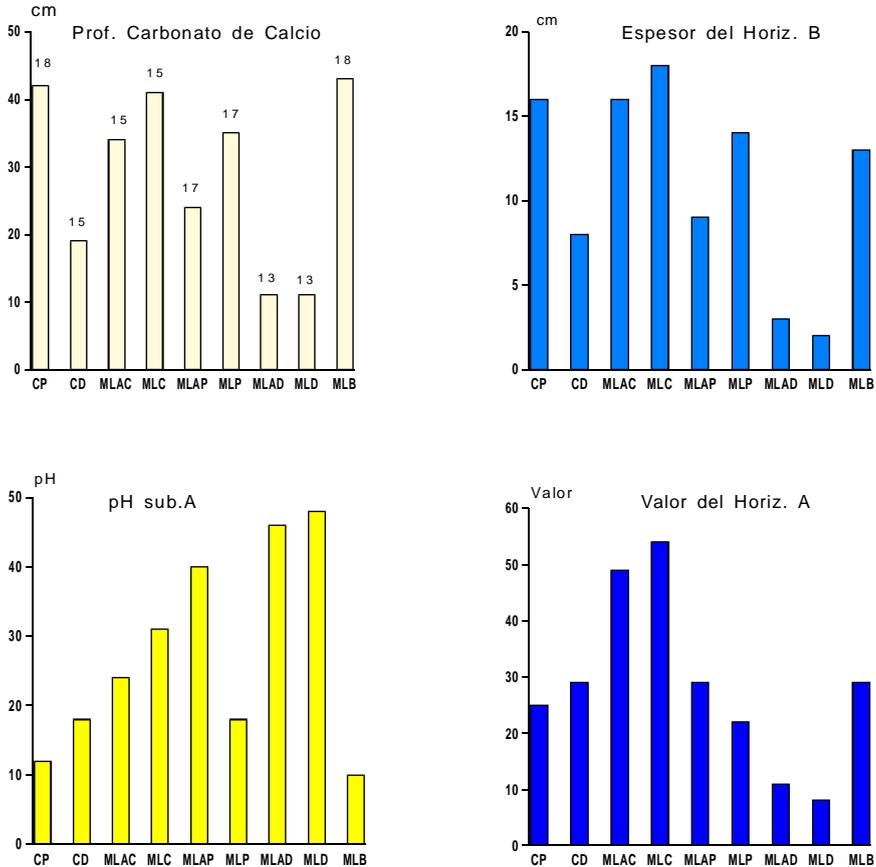


Figura 3. Test L.S.D. de comparación de medias. C.P, cimas planas; CD, cimas convexas; MLAC, medias lomas altas cóncavas; MLC, medias lomas cóncavas; MLAP, medias lomas altas planas; MLP, medias lomas planas; MLAD, medias lomas altas convexas; MLD, medias lomas convexas; MLB, medias lomas bajas. Los números en las columnas representan el n para cada situación. Los n son iguales para todas las variables

Figure 3. L.S.D. means comparison test: C.P, plane tops; CD, convex tops; MLAC, concave high middle slopes; MLC, concave middle slope; MLAP, plane high middle slopes; MLP, plane middle slopes; MLAD, convex high middle slopes; MLD, convex middle slopes; MLB, low middle slopes. Numbers in column represent the n in each situation. The n is the same for all variables

## PROCESOS DE DESCALCIFICACIÓN - CALCIFICACIÓN

Como característica particular del área se destaca la presencia en los perfiles de suelos, de horizontes enriquecidos en carbonato de calcio (horizontes cálcicos y/o petrocálcicos, perfiles 2, 3, 4, 5, 9; Tabla 1).

Tanto la morfología como la profundidad a la que se encuentra el  $\text{CaCO}_3$  presentan una estrecha relación con las variables espaciales forma de la pendiente y posición (Figura 3). Se encuentra a menor profundidad en cimas y pendientes convexas y en posición de media loma alta u hombro sobre pendientes planas. Igualmente el pH del horizonte subsuperficial presenta en estos sectores los mayores valores por la influencia del  $\text{CaCO}_3$  (Figura 3).

En cuanto a la morfología, sobre pendientes de forma convexas, los horizontes cálcicos son de tipo pulverulentos o chalky, (Esteban y Klappa, 1983). Las características granulométricas y mineralógicas de la matriz de estos niveles son similares a los sedimentos loésicos de los suelos mayoritarios del área de edad Pleistoceno Superior - Holoceno inferior (Manzur 1995, 1996).

La acumulación de carbonato en los horizontes enriquecidos en  $\text{Ca}^{++}$ , habría comenzado en períodos húmedos posteriores, posiblemente a partir del Hypsithermal u Optimun Climaticum del Holoceno inferior a medio. Por otra parte la presencia de líneas de rodados en algunos perfiles (perfil 9) y los cambios abruptos en la granulometría con respecto a los horizontes superficial (perfil 5, Tabla 1), permi-

ten considerar a estos niveles como discontinuidades litológicas.

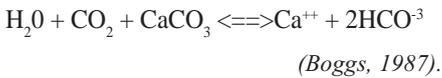
En pendientes cóncavas y cimas planas o muy suavemente convexas los horizontes cálcicos alcanzan hasta un 15% de carbonato y la potencia edáfica por encima de ellos entre 80 y 100 cm.

Por último sobre cimas convexas se encuentran las acumulaciones de mayor desarrollo, (perfil 4; Tabla 1; Figura 2). El nivel superior es una costra litificada o hardpan (Esteban y Klappa, 1983) de espesor promedio de 10 cm y máximo de 15 cm, y hasta un 80% de  $\text{CaCO}_3$ . La estructura predominantes es brechosa, observándose además de manera subordinada estructuras laminar, maciza y concrecional. A este nivel se le asigna un grado evolutivo IV (Machette, 1985). La micrita es el componente petrográfico dominante observado, y además abundantes litoclastos y ooides. La microestructura predominantes es brechosa.

El origen del  $\text{CaCO}_3$  en un aspecto muy discutido. Dadas las características estructurales del área (una pampa de altura) y su posición elevada y aislada se descarta cualquier aporte sedimentario que no sea eólico. Por otra parte la composición química del basamento cristalino, salvo niveles localizados de mármoles y rocas básicas, presenta bajos tenores de calcio por lo que también se descarta un aporte mayoritario de  $\text{Ca}^{++}$  a partir de la meteorización de minerales de basamento cristalino.

Dado el carácter loésico de los sedimentos superficiales del área, se considera una génesis similar para la mayor proporción de Ca presente en los niveles cálcicos.

La disolución del carbonato de calcio presente en los sedimentos como bicarbonato se produce por el aumento de la presión de CO<sub>2</sub>, provocado por la intensa actividad biológica del suelo (respiración). Se genera la reacción reversible:



Es interesante destacar que al menos de cada 2 moléculas de CO<sub>2</sub> presentes en los calcretes, una proviene indirectamente de la atmósfera a través de la actividad orgánica. Si bien hay un lavado inicial a partir de la actividad pedogenética, la baja permeabilidad del sustrato (basamento cristalino) favorece la formación de niveles freáticos estacionales, por lo que a partir de la desecación de estos niveles se produce la precipitación de los carbonatos.

Al considerar el alto porcentaje de carbonato de los niveles de hardpan como procedentes mayoritariamente a partir del lavado de los sedimentos suprayacentes, permitiría además suponer para contenidos de carbonato medios y bajos de los sedimentos originales, procesos cíclicos de depositación, pedogénesis, erosión, asociados a la alternancia climática del Cuaternario superior, (Buschiazzo, 1990). El alto grado de desarrollo de los hardpan indicaría que su formación habría comenzado al menos durante el Pleistoceno superior.

### PROCESO DE ILLIMERIZACIÓN

Es otro de los procesos destacados en los suelos dominantes del área; se evidencia a través de la clara presencia de cutanes

arcillo-húmicos y arcillosos. La existencia en el área de un clima templado húmedo con estaciones contrastadas, materiales parentales limosos y un humus tipo mull son condiciones que favorecen ampliamente la illimerización (Duchaufour, 1984, Dorrnsoro y Aguilar, 1988). El relieve influye directamente sobre el comportamiento del agua y por lo tanto sobre la dinámica del proceso.

En presencia de carbonatos libres el lavado es prácticamente nulo, debido a que las arcillas permanecen inmovilizadas en el interior de agregados muy estables. Esto justifica el menor espesor medio (Figura 3) evidenciado en los horizontes B en sectores donde el carbonato de calcio (o niveles de calcretes) se encuentran más cerca de la superficie (pendientes convexas). Los mayores incrementos de arcilla en los horizontes iluviales se presentan en los perfiles 2 y 7 (Tabla 3): en el perfil 2 el horizonte Bt2 (48% de arcilla) se encuentra inmediatamente por encima de un horizonte petrocálcico; el significativo incremento de arcilla se asocia a condiciones de baja permeabilidad del horizonte petrocálcico lo que impide la migración profunda de las arcillas. En el perfil 7 en cambio el alto porcentaje de

Tabla 3. Relaciones de arcilla entre horizontes  
*Table 3. Clay content relationship among horizons*

Perfil	B/A	B/C
Perfil N° 1	<u>1.25</u>	1.73
Perfil N° 2	<u>1.50</u>	2.38
Perfil N° 3	<u>1.22</u>	1.22
Perfil N° 5	<u>1.17</u>	1.31
Perfil N° 6	<u>2.32</u>	2.50
Perfil N° 7	<u>1.55</u>	1.90
Perfil N° 8	<u>1.23</u>	-

arcillas del horizonte Bn1 (51%) se vincula directamente a la condición alcalino-sódica de dicho horizonte (Panigatti, 1981). Esto por otro lado favorece el lavado de los horizontes superficiales (proceso de leucinización).

Es importante destacar que la heterogeneidad granulométrica de los materiales parentales en el área es alta por lo que no es sencillo realizar balances ajustados de ganancias o pérdidas de arcillas con respecto al material originario. Los horizontes iluviales con mayor porcentaje de arcillas se encuentran en pendientes cóncavas, debiéndose considerar la incidencia del aporte de coloides desde los sectores más elevados en el relieve.

#### PROCESO DE ALCALINIZACIÓN

Se presentan en la región suelos con horizontes B con un alto porcentaje de sodio intercambiable (>15%) y estructura columnar (perfiles 6 y 7, Tabla 1; Figura 2). Estos suelos se ubican de manera mayoritaria en pendientes cóncavas y en menor medida sobre pendientes planas (Figura 2). El análisis del extracto de saturación del horizonte Bn1 del perfil 7 señala un amplio predominio del catión

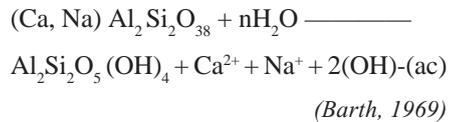


Figura 4. Movilidad relativa de los iones  $\text{Ca}^{++}$  y  $\text{Na}^+$

Figure 4. Relative mobility of  $\text{Ca}^{++}$  and  $\text{Na}^+$  ions

$\text{Na}^+$  y de los aniones  $\text{CO}_3^-$  y  $\text{HCO}_3^-$  con muy escasa presencia de cloruros y sulfatos (Tabla 4).

Se considera que el  $\text{Na}^+$  de cambio es un producto de alteración de los componentes minerales del suelo. La mineralogía de arenas del perfil 6 refleja un amplio predominio de plagioclasas (anortita 30-35) y feldespatos alcalinos, con marcados signos de alteración, lo que confirmaría el aporte del  $\text{Na}^+$  (Manzur, 1996). De acuerdo a Dever (1988) aproximadamente un 80% de los productos de alteración por la acción del  $\text{CO}_2$  presentes en aguas meteóricas estacionales, proviene de las plagioclasas. Los silicatos anhidros como los feldespatos, se convierten a silicatos hidrolizados como las micas y minerales de arcillas, liberando iones  $\text{Ca}^{++}$  y  $\text{Na}^+$  a la solución:



El origen del  $\text{CO}_3^-$  y  $\text{HCO}_3^-$  está vinculado a la intensa actividad orgánica de

Tabla 4. Extracto de saturación del horizonte  $\text{B}_{n1}$ , del perfil N° 7, (relación suelo/agua: 1:5)  
Table 4. Saturation extract of the  $\text{B}_{n1}$  horizon on profil N° 7, (soil/water relationship 1:5)

Cationes (meq./l)		Aniones (m.e.q./l)	
$\text{Ca}^{++}$	0.28	$\text{Cl}^-$	0.06
$\text{Mg}^{++}$	0.28	$\text{SO}_4^{--}$	0.21
$\text{Na}^{++}$	2.99	$\text{CO}_3^{--}$	-
$\text{K}^+$	0.19	$\text{CO}_3\text{H}^-$	3.50
Total	3.74	Total	3.77
Cond.	2180 umhos		
R.A.S	5.4		

los suelos. Por otra parte, debido a que las concentraciones de  $\text{CO}_3^-$  y  $\text{HCO}_3^-$  se incrementan en la solución durante la evaporación, el  $\text{Ca}^{++}$  y  $\text{Mg}^{++}$  precipitan como carbonatos debido a su menor solubilidad y el  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  se acumulan en la solución ascendiendo por capilaridad; esto produce como resultado un incremento en el RAS (Rengasamy y Olson, 1991).

Hay que tener en cuenta además no solo un ascenso vertical de los iones, sino una evolución lateral o catena geoquímica (Duchaufour, 1984). En las pendientes el  $\text{Ca}^{++}$  y  $\text{Mg}^{++}$  precipitan en las partes altas debido a su menor solubilidad mientras que el  $\text{Na}^+$  migra hacia las partes medias y bajas. Este aspecto se manifiesta claramente en el área a partir de la presencia de suelos con horizontes cálcicos principalmente en posiciones de cimas convexas y medias lomas altas en pendientes planas, mientras que los suelos sódicos se encuentran mayoritariamente en pendientes cóncavas. Se considera que la mayor parte de los suelos sódicos en el área evolucionan a partir de esta última situación.

El menor porcentaje de sodio de intercambio del horizonte  $\text{B}_{n1}$  del perfil 6 con respecto a los horizontes subsuperficiales, está indicando probablemente un proceso de degradación de las características sódicas o solodización incipiente. En la parte superior de las columnas se observa un color 10YR 6/2 en seco, evidenciando la degradación del horizonte nátrico por la dispersión de los coloides. Esto puede provocar que en situaciones de pendientes se produzca un lavado sucesivo del horizonte sódico, llegando a producirse erosión en túnel, (Jones, 1981; Rengasamy

y Olson, 1991), el cual es un proceso común en el área. Debido a este aspecto, la alcalinización puede considerarse como un proceso de degradación de suelos, los cuales se desarrollan en los puntos siguientes.

## PROCESOS DE DEGRADACIÓN DE SUELOS

Dentro de estos procesos se incluyen todos aquellos que llevan a una simplificación del perfil del suelo. Hole (1961) y Johnson *et al.* (1987) señalan que las pedoturbaciones proisotrópicas incluyen todos aquellos procesos que mezclan o destruyen horizontes, subhorizontes o estratos genéticos en suelos o impiden su formación, tales como movimientos en masa o creep; erosión subsuperficial (tubificación); erosión superficial y procesos de faunaturbación, entre otros.

## PROCESOS DE TUBIFICACIÓN Y REMOCIÓN EN MASA

Aproximadamente un 5% del área total está afectada por cárcavas. Estas cárcavas son poco profundas y extendidas lateralmente y se encuentran localizadas principalmente sobre pendientes cóncavas y planas. Los procesos se manifiestan superficialmente de la siguiente manera :

i) manifestación incipiente: como rasgos superficiales incipientes se observan líneas en el paisaje con cambios notables en la vegetación; en pendientes cóncavas estas líneas confluyen formando un patrón subparalelo y sobre pendientes planas suelen observarse con formas de cuña o herradura (Figura 5a).

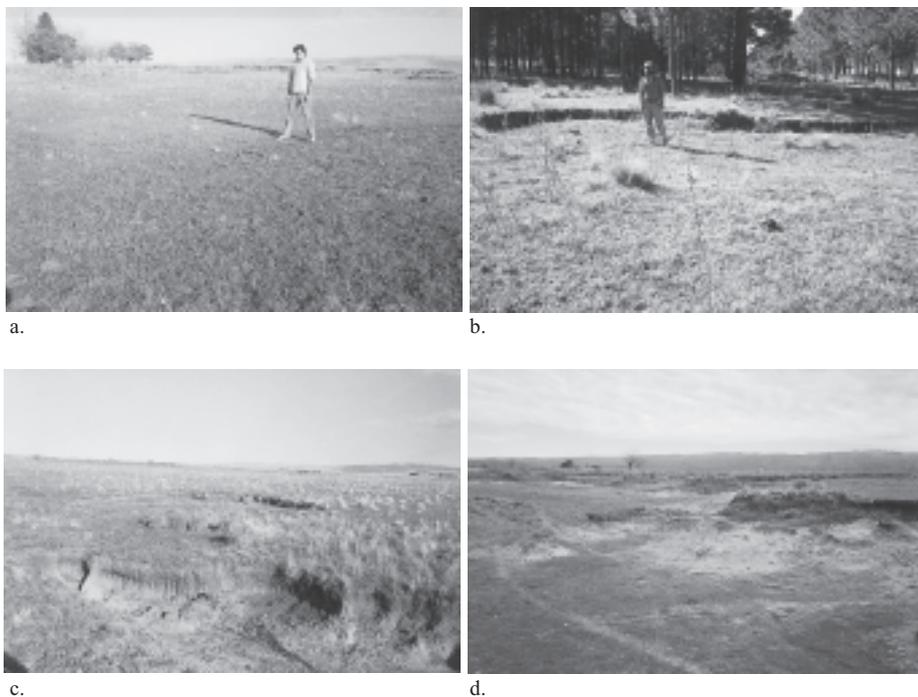


Figura 5. Manifestación superficial de los procesos de tubificación y remoción en masa. (ver explicación en el texto)

Figure 5. Superficial evidences of piping and mass wasting processes (see explanation in the text)

ii) como característica de evolución posterior se observan subsidencias de poco espesor a partir del deterioro de las condiciones físicas del suelo, lo que favorece la acción de la erosión superficial, produciéndose surcos (Figura 5b).

iii) A partir de la formación de surcos profundos, se produce un retroceso de cabeceras por remoción en masa y una profundización debido a erosión superficial (Figura 5c), lo que provoca la existencia de grandes cárcavas (Figura 5d).

Por otra parte los suelos de los sectores afectados se caracterizan por la pre-

sencia de horizontes con altos valores de Na de intercambio y/o ricos en arcillas.

El proceso de tubificación ha sido ampliamente estudiado y hay reportes de su existencia en un amplio espectro de condiciones ambientales y edáficas. En suelos con propensión a fracturarse, (argílicos o nátricos) y condiciones limitadas de drenaje, se puede producir erosión en el sentido del gradiente hidráulico. La presencia de altos porcentajes de  $\text{Na}^+$  de intercambio, en sedimentos limosos, genera condiciones de dispersión lo que provoca que en situaciones de pen-

dientes se produzca un lavado sucesivo del horizonte B sódico, llegando a producirse erosión en túnel (Jones, 1981; Rengasamy y Olson, 1991). Por otra parte, la presencia de cárcavas incide en gran medida en la evolución de los procesos de tubificación, debido a que, la concentración del flujo en un punto sobre las paredes expuestas incrementa la concentración hídrica, promoviendo un mayor desarrollo del túnel y facilitando la formación de otros. La posición y forma del paisaje, ha sido reportada, como un factor fuertemente condicionante debido a su control sobre la dinámica hídrica (Jones, 1981).

Los horizontes arcillosos durante los períodos húmedos, pueden pasar de un estado sólido a un estado plástico. En situación de gradientes elevados, se produce un lento deslizamiento hasta provocar un corte o rotura usualmente en forma de medias lunas. De acuerdo a Derrau (1966), esta evolución es frecuente en vertientes margosas, dominadas por una cornisa calcárea. Estas condiciones pueden equipararse a las del área de estudio debido a la presencia tanto del basamento como de horizontes cálcicos y petrocálcicos los cuales presentan muy bajo nivel de infiltración favoreciendo la saturación de los niveles superiores.

Surge como evidencia que los procesos de degradación de suelos en el área son una respuesta en parte a un *grado evolutivo del sistema*. Esto puede ser considerado como un *fenómeno de evolución regresiva de los suelos* (Johnson y Watson-Stegner, 1987).

## ACCIÓN DE LA FAUNA

El proceso de faunaturbación es significativo en el área, debido al comportamiento de las vizcachas. Al escarbar para realizar sus madrigueras remueven el sustrato provocando una mezcla del suelo con los niveles cálcicos. Los huecos de las madrigueras favorecen el aumento del gradiente hidráulico y por la tanto la acción del proceso de tubificación.

## EROSIÓN SUPERFICIAL

Los suelos del área son susceptibles a la erosión hídrica. Los materiales parentales loésicos, los elevados gradientes y el clima favorecen la presencia de procesos erosivos hídricos superficiales (erosión laminar y lineal), frente a situaciones de pérdida de la cubierta vegetal, principalmente vinculado al uso agrícola de los suelos, o por condiciones de sobrepastoreo.

## CONSIDERACIONES GENERALES Y CONCLUSIONES

En el área de estudio los procesos de evolución y de degradación de suelos presentan una estrecha relación en función de los factores geomórficos forma y posición en la pendiente. Estos factores inciden sobre la dinámica natural del agua (y por ende en el balance hídrico de los suelos) favoreciendo la existencia de diferentes tipos de flujos hídricos tanto de forma superficial como subsuperficial (Figura 2).

Sobre cimas convexas la característica particular en los perfiles de suelos es la

presencia de horizontes cálcicos litificados (calcretes). Los niveles de mayor desarrollo, incluirían más de un ciclo pedogenético en su génesis, vinculados a la alternancia climática del Pleistoceno Superior y Holoceno. Una condición similar se señaló para los horizontes cálcicos o niveles pulverulentos de los suelos de pendientes convexas, considerados como discontinuidades litológicas. Posiblemente estos suelos bajo la condición climática actual y sin presión de uso, no se encuentren muy lejos de un *estado termodinámico estacionario* (Smeck *et al.*, 1983). Si bien el clima actual favorece la *descarbonatación de los suelos*, los fenómenos de ascenso vertical de carbonato por la actividad orgánica posiblemente la equilibren. A esto se suma la alta estabilidad y lenta evolución de los compuestos húmicos presentes (mull carbonatados).

Sobre cimas y pendientes planas los suelos son profundos presentando horizontes iluviales espesos. Los horizontes superficiales presentan humus tipo mull sin carbonatos libres. Se considera que el sistema suelo se encuentra en estos sectores bajo condiciones de evolución progresiva «P» (Johnson y Watson Stegner, 1987).

Sobre pendientes cóncavas se destaca la presencia del proceso de alcalinización. El  $\text{Na}^+$  es un producto de alteración de las plagioclasas (anortita 30-35) mientras que los aniones  $\text{CO}_3^{2-}$  y  $\text{HCO}^-$  están asociados a la intensa actividad orgánica de los suelos. El  $\text{Na}^+$  ha tenido tanto una fluctuación vertical con máximo ascenso en el perfil del suelo en las estaciones secas, como una movilidad lateral o *catena*

*geoquímica*. La presencia de horizontes con altos porcentajes de  $\text{Na}^+$  de cambio y arcillas favorece la acción de los procesos de tubificación y remoción en masa. Desde un punto de vista termodinámico (Smeck *et al.*, 1983, Ibañez *et al.*, 1991) puede considerarse que el sistema ha aumentado su organización (pedogénesis progresiva), hasta un punto de evolución donde las condiciones de alcalinidad y plasticidad de los horizontes, favorecen la acción del proceso de tubificación (pedogénesis regresiva). Esto genera una *marcada disminución de la organización del sistema*, o en otras palabras, un fuerte aumento de la entropía. Por último, la estabilización de las cárcavas por la vegetación, está señalando un nuevo ciclo de organización del sistema suelo.

Si bien los suelos son susceptibles a la erosión hídrica bajo condiciones de pérdida de cubierta vegetal, la acción antrópica incide sobre un medio extremadamente frágil pero que lejos de ser homogéneo presenta una gran variedad de procesos. Naturalmente el sistema tiende en algunos sectores hacia la organización o evolución y en otros simultáneamente se producen procesos de degradación.

## AGRADECIMIENTOS

A los Geólogos Jorge Sanabria, Agustín Balbis, Andrea Pasquini, Graciela Argüello, Gabriela Sacchi y Héctor Espil, con quienes aprendí a comprender el universo de los suelos.

## BIBLIOGRAFÍA

BARTH, T.F.W., 1969. Feldspars. Jhon Wiley & Sons INC (Eds.), New York. 261 pp.

- BOGGS, S. 1987. Principles of Sedimentology and Stratigraphy. Merrill Publishing Company, 748 pp.
- BOUMA, J., 1993. Soils: A global mandate. Lecture at the plenary session of the Soil Sci.Soc.Am., Cincinnati, OH.pp. 5-8.
- BUOL, F; D. HOLE and R. MC.CRACKEN, 1989. Soil genesis and classification.3a.ed. Iowa State University Press, Ames. 0. 567 pp.
- BUSCHIAZZO, D.E., 1990. Calcrete formation in soils of the Argentinean Pampas. Ernst-schlinging. Tagungsband pp.92-106.
- CANTU, M.P., 1992. El Holoceno de la provincia de Córdoba. En: El Holoceno de Argentina, M. Iriondo (Ed.) CADINQUA pp.1-16.
- DERRAU, M, 1966. Geomorfología. Editorial Ariel. Barcelona.567 pp.
- DEVER, J., 1988. The Geochemistry of natural water. Prentice Hall. New Jersey. 437 p.
- DORRONSORO, C. y J. AGUILAR, 1988. El proceso de iluviación de arcillas. Anales de Edafología y Agrobiología: 311-350.
- DUCHAUFOR, PH. , 1984. Edafogénesis y Clasificación. Edit.Mason.493 pag.
- ESTEBAN, M.A and KLAPPA, C.F. 1983. Subaerial exposure environment. Mem. Am. Assoc. Petrol. Geol.33-pp:1-54.
- ETCHEVEHERE, P. 1976 .Normas de Reconocimiento de Suelos. Pub. INTA.Castelar. 97 pp.
- GORDILLO, C.A. y A. LENCINAS, 1979. Sierras Pampeanas de Córdoba y San Luis. Simposio de Geología Regional Argentina. Academia Nacional de Ciencias. Córdoba.
- HALL, G.F., 1983. Pedology and Geomorfology. In Pedogenesis and Soil Taxonomy. I. Concepts and Interactions. Ed. Wilding, N.E.Smeck and G.F.Hall. Elsevier. pp.:117-140.
- HALL, G.F. and C.G. OLSON, 1991. Predicting variability of soil from Landscape Models. In: SSSA, Special publication N°28. M.J.Mausbach and L. Wilding editors pp.:9-24.
- HOLE, F.D. 1961, A classification of pedoturbations and some other processes and factors of soil formation in relation to isotropism and anisotropism. Soil Sci. 91: 375-377.
- IBAÑEZ, J.J., R. JIMENEZ y A. GARCIA ALVAREZ, 1991. Sistemología y termodinámica en edafogénesis. I. Los suelos y el equilibrio termodinámico. Rev. Ecol. Biol. Sol. 27(2):371-382.
- INTA-M.A.G.- R.R.-I.Fo.Na., 1990. Hoja 3166-36. Aptitud Forestal. Santa Rosa de Calamuchita.
- JACKSON, M.L., 1964. Análisis Químico de Suelos.Ed. Omega.Barcelona. 662 pp.
- JOHNSON, D.L. and D.WATSON-STEGNER, 1987. Evolution model of Pedogenesis. Soil Science, Vol.143(5) :349-366.
- JOHNSON, D.L., D. WATSON STEGNER, D.N. JOHNSON and R.J. SCHAETZL, 1987. Proisotropic and proanisotropic processes of pedoturbation. Soil Science 143:278-292.
- JONES, A.A.J., 1981. The nature of soil piping, a review of research. Publ. Geobooks, Regency House, Norwich, England. 286 pp.
- MACHETTE, M.N., 1985. Calcic soil of the south-western United States. Geol. Soc. Am.Spec.Pap. N.203 pp.1-21.
- MANZUR, A., 1995. Aspectos genéticos de los suelos presentes en Atum Pampa y Athos Pampa, Dpto. Calamuchita Prov. de Córdoba. Tesis Doctoral F.C.E.F. y Nat. Univ. Nac. de Cba. 105 pp. Inédita.
- MANZUR, A., 1996. Análisis estratigráfico y mineralógico de los materiales parentales de los suelos de Atum Pampa, Sierras Pampeanas, Córdoba,

- Argentina. XIII Congreso Geológico Argentino y III Congreso de Exploración de Hidrocarburos. Actas IV:239-248.
- MARTINO, R., M. ESCAYOLA y A.SAAL, 1994. Estructura del cuerpo de kinzigita del río Santa Rosa, Dpto. Calamuchita, Prov.de Córdoba. R.A.G.A. 49 (1-2):3-10.
- PANIGATTI, J.L., 1981. Molisoles del norte de la zona pampeana. I. Génesis y Morfología. INTA. Publicación técnica N° 13: 5-22.
- PENNOCK, D.J., B.J. ZEBARTH and E.DE JONG, 1987. Landform classification and soil distribution in hummocky terrain, Saskatchewan, Canadá. Geoderma 40:297-315.
- RENGASAMY, P. and K.A. OLSON. 1991. Sodicity and Soil Structure. Aust. J. Soil. Res. 29: 935-952.
- SMECK, N.E., E.C.A. RUNGE and E.E. MACKINTOSH, 1983. Dynamics and genetic modelling of soil systems. In Pedogenesis and Soil Taxonomy. I. Concepts and Interactions. Wilding, N.E.Smeck and G.F.Hall. (Eds.) Elsevier. pp.:51-81.
- SOIL SURVEY STAFF, 1994. Keys to Soil Taxonomy. SMSS Technical Monograph.N° 19. 5°Ed. Pochahontas Press, Inc. Blacksburg, Virginia.
- U.S.D.A., 1972. Soil Survey Laboratory methods and procedures for collecting soil samples. Soil Surve Invest. Report 1, E.S. Washintong D.C., 79 pp.
- WEBSTER, R. and M.A. OLIVER, 1990. Statistical Methods in Soil and Land Resource Survey. Oxford University Press. 316 pp.

