

**ANÁLISIS DEL PROCESO DE EROSIÓN
EN CÁRCAVAS EN EL NORESTE DE CANELONES
ENTRE 1966 - 2010 (URUGUAY)**



MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES



Facultad de Ciencias



UNIVERSIDAD
DE LA REPUBLICA
URUGUAY

Ing. Agr. Marcelo ITURBURU DI FIORE

2011

Presentado por:

Marcelo ITURBURU DI FIORE

PARA OBTENER EL GRADO DE

MAGISTER EN CIENCIAS AMBIENTALES

UNIVERSIDAD DE LA REPUBLICA
FACULTAD DE CIENCIAS
MAESTRIA EN CIENCIAS AMBIENTALES
MONTEVIDEO, URUGUAY

**Análisis del proceso de erosión en cárcavas
en el NE de Canelones, entre 1966 - 2010, Uruguay**

Orientador: Dr. Marcel Achkar

Co-orientador: MSc. Fernando Pesce

2011

ÍNDICE

Agradecimientos

Lista de cuadros e ilustraciones

RESUMEN	9
ABSTRACT	10
I. INTRODUCCIÓN	11
II. ANTECEDENTES	13
III. ASPECTOS TEÓRICOS	
3.1.- Definición de cárcava	18
3.2.- Factores incidentes (condicionantes)	19
3.2.1.- Factores MORFOMÉTRICOS.....	21
3.2.2.- Factores FÍSICOS	22
3.2.3.- Resistencia del suelo a la Penetración	24
3.2.4.- Factores ANTRÓPICOS	26
3.3.- Procesos y dinámicas de las cárcavas	27
3.3.1.- Procesos de aparición	28
3.3.2.- Procesos de desarrollo.....	29
3.3.4.- Formas resultantes	36
3.4.- Síntesis de aspectos teóricos	39
.	
IV. INTERROGANTES, OBJETIVOS, HIPÓTESIS	
4.1.- Interrogantes	41
4.2.- Objetivos	41
4.3.- Hipótesis	42
V. MATERIALES Y MÉTODOS	
5.1.- Descripción del área de estudio	43
5.2.- Métodos	55
5.3.- Metodología	56

VI. RESULTADOS

6.1.- Resultados a escala de MICROCUENCAS:	
6.1.1.- Incremento superficie de las cárcavas encada microcuenca (ΔEt).....	67
6.1.2.- Variables MORFOMÉTRICAS.....	70
6.1.3.- Variables FÍSICAS:	
6.1.3.1.- Jerarquía de evacuación hídrica.....	73
6.1.3.2.- Pendiente Media.....	73
6.1.3.3.- Resistencia del suelo a la Penetración.....	74
6.2.- Resultados a escala de CÁRCAVAS:	
6.2.1.- Tasa de crecimiento de las cárcavas (TCA)	81
6.2.2.- Variables MORFOMÉTRICAS	81
6.2.3.- Variables FÍSICAS	82
6.3.- Resultados ESTADÍSTICOS:	
6.3.1.- Síntesis de Resultados Estadístico	85
6.3.2.- Análisis de Componentes Principales	86

VII. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

7.1.- A escala de MICROCUENCAS	88
7.2.- A escala de CÁRCAVAS	92
7.3.- Cabeceras ACTIVAS	92

VIII. MODELO INTERPRETATIVO.....

94

IX. CONCLUSIONES.....

96

9.1.- Temas para nuevos trabajos de investigación.....	103
9.2.- Recomendaciones.....	103

X. BIBLIOGRAFÍA.....

105

ANEXOS

Anexo I.- MICROCUENCAS: morfometría descriptiva y variables físicas

Anexo II.- CÁRCAVAS: morfometría descriptiva y variables físicas

Anexo III.- Análisis Estadístico

INDICE DE FIGURAS

Fig.	Descripción	Pág.
1.-	Uruguay, intensidad del proceso erosivo.	26
2.-	Etapas de la formación de una cárcava según <i>Leopold, Woldman y Miler (1964)</i>	30
3.-	Dimensiones de una cárcava, Cárcava N° 10	31
4.-	Crecimiento “remontante” de cabecera	33
5.-	Área de estudio: Zona Norte	44
6.-	Área de estudio: Zona Sur	45
7.-	Emplazamiento del Área de estudio: Municipio de San Jacinto, NE de Canelones	50
8.-	Caracterización física de Zona Norte	51
9.-	Caracterización física de Zona Sur	52
10.-	Secuencia Metodológica	58
11.-	Proceso metodológico para el análisis de cambios y cálculo de TCA	61
12.-	Zona Norte: Cárcavas N° 1, 2, 3, 4, 5 y 6	66
13.-	Zona Sur: Cárcavas N° 7, 8, 9 y 10	66
14.-	Incremento de la superficie de las cárcavas (Zona Norte)	67
15.-	Incremento de la superficie de las cárcavas (Zona Sur)	68
16.-	Zona Norte: Cárcavas N° 1 y N° 2	69
17.-	Zona Sur: Cárcavas N° 7 y N° 10	69
18.-	RESULTADOS Zona Norte: Microcuencas N° 3, N° 4, N° 6	71
19.-	RESULTADOS Zona Sur: Microcuenca N° 8	71
20.-	Promedio de Valores de Resistencia a la Penetración (RP): cabeceras e interfluvio	76
21.-	Cárcava N°1, puntos de muestreo de RP en cabeceras principales e interfluvio.	76
22.-	Valores Promedio de RP (MPa) en las cabeceras	77
23.-	Valores Promedio de RP (MPa) en el interfluvio	77
24.-	Valores de RP (MPa) entre 0 y 2,5 cm	78
25.-	Valores de RP (MPa) entre 5 y 7,5 cm	79
26.-	Valores de RP (MPa) entre 10 y 27,5 cm	79
27.-	Valores de RP (MPa) entre 30 y 40 cm	80
28.-	Foto de Cárcava N° 1, cabecera principal con desmoronamiento	93
29.-	Foto de Cárcava N° 8, transformada en un Tajamar	95
30.-	Serie de Cárcavas en Zona Norte	99
31.-	Foto de Cárcava N° 1, inscrita en una cuenca mediana de 23 ha	100
32.-	Foto de Cárcava N° 10, inscrita en una cuenca mediana de 5 ha	100
33.-	Cárcavas N° 1 y N° 2 (Zona Norte)	101
34.-	Cárcavas N° 7 y N° 10 (Zona Sur)	102

INDICE DE TABLAS

Tabla	Descripción	Pág.
I.-	Diferentes criterios de clasificación de cárcavas	36
II.-	Clasificación de cárcavas según su forma en planta (Peralta, 1977)	37
III.-	Clasificación de cárcavas	38
IV.-	Tendencias en el cambio de uso del suelo en el departamento de Canelones	48
V.-	Fotografías aéreas ingresadas al SIG	56
VI.-	Porcentaje de superficie ocupada por cárcavas en las microcuencas (ΔEt)	67
VII.-	MICROCUENCAS: variables morfométricas	68
VIII.-	MICROCUENCAS: variables físicas	73
IX.-	RP (MPa) en las cabeceras y distancia al interfluvio (m)	75
X.-	Evolución de la superficie de las cárcavas (ha) y cálculo de TCA	81
XI.-	CÁRCAVAS: variables morfométricas	81
XII.-	Análisis estadísticos según diferentes: cortes temporales, número de geoformas (cárcavas) y cantidad de variables analizadas	82
XIII.-	Síntesis de Análisis I.	83
XIV.-	Síntesis de Análisis II.	84
XV.-	Síntesis de Análisis III.	85
XVI.-	Síntesis de Resultados Estadísticos	87
XVII.-	Cárcavas N° 5 y N° 8: Área (ha) en cada corte temporal	94
XVIII.-	Evolución del Área de la superficie ocupada por la cárcava (1966-2010)	96
XIX.-	Esperado (sin intervención antrópica) calculado con la ecuación predictiva	96
XX.-	Área real medida con GPS	96

RESUMEN

En este trabajo se analizan los procesos de formación y desarrollo así como los factores que influyen y determinan la intensidad de los procesos involucrados en la erosión por cárcavas. Se realizó una caracterización cuantitativa del proceso evolutivo de la erosión de dos series de 10 cárcavas localizadas en dos zonas rurales del Noreste (NE) del Departamento de Canelones, Uruguay, entre 1966-2010. Se utilizó para ello la herramienta Arc View Gis 3.2 para generar un Sistema de Información Geográfico (SIG), que permitió interpretar las modalidades de expansión y los cambios producidos en la geometría de las cárcavas. Se analizó la incidencia de los factores forzantes que inciden en la expansión de las cárcavas: variables morfométricas y físicas; se aplicó un modelo explicativo, que integrando estas variables, permite interpretar, con base empírica, la dinámica de los procesos que se producen en las microcuencas que inciden en la extensión de las cárcavas. Por último, en una de las cárcavas se identificó las cabeceras y se relacionó su crecimiento con las propiedades físicas del suelo de la microcuenca en la que se inscribe, a los efectos de inducir una interpretación, del proceso erosivo, para el conjunto de las cárcavas en estudio.

Palabras claves: erosión, cárcavas, morfometría, Sistema de Información Geográfico (SIG), fotografías aéreas.

Key words: erosion, gully, GIS, aerial photographs

I.- INTRODUCCION

El suelo es un cuerpo natural que se forma, a través del tiempo, por la acción conjunta de los siguientes factores: clima, relieve, agua, roca original, organismos vivos. La acción del clima, el relieve, el agua y los organismos vivos, que actúan mediante procesos físicos, químicos y biológicos sobre la roca madre, dan origen al suelo.

Uno de los recursos naturales esenciales con los que cuenta la humanidad son los suelos, cuya génesis requiere de muchos años, el hombre a menudo lo utiliza de forma inadecuada pese a su importancia, por lo que se degrada paulatinamente hasta llegar a su pérdida total.

Por la importancia de los suelos para la economía uruguaya, como país agroexportador, es una necesidad el manejo sustentable de este recurso natural a partir de la implementación de medidas de conservación y de restauración.

Hace ya más de tres décadas, estudios realizados en Uruguay demostraron que, el 31% de las tierras se encuentran afectados por grados diversos de erosión, hecho que resulta aún más grave al afectar a las tierras más productivas del país. (Cayssials, et al. 1977).

Canelones es el departamento de Uruguay en el que se extienden los suelos con mayor grado de erosión del suelo. García (2010) sostuvo que “el uso intensivo de los recursos naturales, en parte debido a la expansión agrícola que se verifica en el agro uruguayo en los últimos años ha puesto en la agenda pública el tema de la conservación de suelos”, (...) “actualmente estamos haciendo una agronomía forense, vamos a constatar que el suelo ya murió por la erosión, cuando en realidad tenemos que prevenir” destacó.

La ley 13.667 de 1968 o Ley de Conservación de Suelos. establece, entre otras muchas potestades, que el Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca (MGAP) promoverá medidas preventivas tendientes a la conservación del suelo y la humedad, tales como regulación del uso de la tierra, métodos de cultivo y uso de la vegetación y prohibición de ciertas prácticas y cultivos en determinadas áreas.

Estudios realizados por la Dirección de Suelos y Fertilizantes del MGAP (1985) determinaron que el 36% de los suelos del NE de Canelones sufren condiciones de erosión severas a muy severas en los cuales es imposible desarrollar la agricultura por la presencia de cárcavas; pero además un 30 % más sufre condiciones moderadas de erosión.

Si bien en muchos casos el proceso erosivo se ha intentado controlar a partir del aislamiento de las cárcavas, la siembra de coberturas, sistematización de desagües, o por implantación de diferentes tipos de vegetación, no se visualiza que exista un trabajo sistemático de medidas de manejo de la erosión por falta de información básica.

El análisis del proceso de erosión en cárcavas a través de variables que representen a los factores morfométricos y físicos permitirá comprender el avance lateral y longitudinal de las mismas. A partir del análisis cuantitativo de la evolución de las cárcavas es que se espera comprender los procesos de erosión, y cuantificar temporalmente las dimensiones que alcanza una cárcava individual o un patrón de cárcavas. Para prevenir la formación de cárcavas o evitar que una vez iniciada continúe creciendo es necesario comprender los complejos procesos que pueden contribuir a su formación y/o su desarrollo.

En este estudio se analiza un área del noreste de Canelones, utilizando el modelo explicativo del comportamiento diferencial de las cárcavas, con fundamentos cuantitativos y base empírica propuesto por [Pesce 2010](#), para el análisis de cárcavas en la zona costera (Parque Lacustre Garzón). Para intentar tipificar las cárcavas según su comportamiento evolutivo y esbozar medidas para prevenir el avance de la erosión que sirvan como insumo a futuros planes de manejo.

II.- ANTECEDENTES

Según estudios efectuados por [Oldeman \(1994\)](#), a escala global, la erosión hídrica es el proceso dominante en la degradación de los suelos, inducida por intervenciones humanas, el cual afecta cerca de 11 millones de km² (8,5 % de la superficie terrestre). En conjunto, la erosión hídrica, la eólica, la degradación química y la física afectan en diferentes niveles de intensidad; casi 20 millones de km², esto es el 15% de la superficie global, o 66% de las tierras potencialmente arables en el mundo.

[Zinck \(2005\)](#) sostuvo que las propiedades edáficas y la posición de los suelos en el paisaje determinan su susceptibilidad a ser dañados por procesos como: la erosión laminar, la incisión de cárcavas y los movimientos en masa. Dada la relevancia que tiene en la reducción de tierras disponibles para la actividad agropecuaria, la erosión en cárcavas constituye un serio problema, en ciertas áreas donde el clima, la litología, los tipos de suelos, las características del relieve y los usos del suelo favorecen los procesos de erosión. Establecer las causas, determinar los procesos y establecer medidas de predicción y control de la erosión, ha despertado el interés de muchos investigadores ([Ireland et al. 1939](#), [Thompson 1964](#), [Heede 1979](#), [Imeson y Kawaad 1980](#), [Donker y Damen 1984](#), [Moore et al. 1988](#), [Meyer y Martinez-Casanova 1988](#), [Bocco 1990](#), [Vazquez y Zinck 1994](#), [Palacio y Lopez 1994](#), [Porta et al. 1994](#), [Zinck 1997](#), [Sganga, 1999](#), [Valentin et al. 2005](#), [Santiago, 2007](#), [Pesce 2009](#)) entre otros.

Los mecanismos que intervienen en la erosión por cárcavas todavía no se entienden cabalmente, lo que vuelve compleja la definición determinista de modelos interpretativos, explicativos y/o predictivos. Sin embargo, en los últimos años se han realizado importantes avances en la comprensión del proceso, tal como lo establecieron investigaciones efectuadas por [Zinck et.al \(2001\)](#) formulando que una cárcava, puede iniciarse a partir de un entalle de surco, de un deslizamiento de suelo, o inclusive a partir de un conducto subterráneo de sufusión, y que las

innovaciones tecnológicas y metodológicas para la recolección de datos para el reconocimiento de rasgos en la superficie del terreno y la modelización cartográfica en SIG, ofrecen interesantes posibilidades para vencer las limitaciones de la modelización determinística.

Por su parte [Morgan \(1997\)](#) combinando análisis históricos y geomorfológicos comprobó que la erosión es un proceso natural, pero que la distribución de su intensidad, en el tiempo y en el espacio, es el resultado de la interacción de circunstancias físicas y humanas; es la resultante de los entornos: natural y cultural.

En Uruguay, estudios realizados por la Dirección de Suelos y Aguas del Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca ([MGAP, 1989](#)), indican que la pérdida bruta de los suelos en las áreas agrícolas del país son del orden de 31 ton/ha/año, nivel muy alto si se le compara con el de Estados Unidos (12 ton/ha/año). El análisis concluye que un 30% del territorio uruguayo, o sea más del 80% de las tierras arables, están siendo afectadas por grados diversos de erosión, donde la alta intensidad y uso inadecuado de los suelos (monocultivo, aradas a favor de la pendiente, tecnologías inapropiadas, etc.) y obstáculos socio-económicos: escala, mercado, desconocimiento del funcionamiento del sistema han provocado deterioro grave en las que constituyeron las mejores tierras agrícolas del país.

Por su parte, investigaciones efectuadas por [Sganga \(1999\)](#) permitieron evaluar la magnitud de la erosión en cárcavas en Uruguay, su tasa de crecimiento y desarrollo, las técnicas de uso y manejo, tendiente a recuperar las tierras afectadas y llegar a las siguientes resultados: 1) la erosión en cárcavas crea sitios con desertificación aguda, 2) los avances en las cabeceras varían según el tipo de suelo, la ubicación en el paisaje y la pendiente y 3) los efectos de la presión del pastoreo y las quemadas favorecen su formación. Las zonas con mayores problemas de erosión de suelos han sido particularmente algunas áreas hortícolas del sur del Uruguay, donde el fenómeno erosivo abarca las tierras del noreste del Departamento de Canelones.

Estudios realizados por la Dirección de Suelos del MGAP ([MGAP, 1989](#)), determinaron que el 36% de los suelos del NE de Canelones sufren condiciones de erosión severas a muy severas, en los cuales prácticamente es imposible desarrollar la agricultura; pero además determinaron que un 30% más sufre condiciones moderadas de erosión. Estas áreas chacareras hacen que los suelos de la región NE de Canelones sea una de las más degradadas del país.

En el año 2004, [Spoturno y colaboradores](#) elaboraron la Carta Geológica y de Recursos Minerales del Departamento de Canelones a escala 1:100000 que constituye una síntesis importante que provee elementos para el conocimiento del medio físico aunque la investigación no tuvo como objeto el análisis de erosión.

Considerando específicamente a la erosión en cárcavas como producto histórico con variaciones espaciales específicas tomando a las microcuencas como unidades de análisis, e integrando herramientas de análisis fotogramétrico, [Cayssials, Long y Pesce \(1995\)](#) desarrollaron un estudio secuencial del proceso de erosión de suelos en la cuenca del A° Tala, en el que analizaron las variables morfométricas como posibles factores de la erosión.

[Pesce \(2009\)](#), realizó un análisis morfométrico secuencial del proceso de erosión en las cárcavas del Parque Lacustre Garzón, Departamento de Rocha, Uruguay, en el que identificó las variables representativas de los factores físicos, morfológicos y antrópicos que intervienen en el proceso de erosión en la zona costera donde se inscriben estas cárcavas y a partir de la utilización de SIG determinó la tasa de crecimiento absoluta (TCA) de la extensión de las mismas. Este trabajo efectuó aportes para la interpretación de la dinámica de cárcavas costeras. Pero dada la relevancia de los suelos en la base económica del país y que los procesos de degradación ocurren en las áreas agropecuarias en todo el territorio nacional, resulta importante realizar un análisis de la evolución de cárcavas en un área continental con diferentes usos del suelo.

Las acciones tendientes a prevenir la erosión de suelos en Uruguay ha tenido diferentes impulsos; en la década del 1990, la tecnología de la siembra directa tuvo un gran avance (Iturburu, 1999), que bien hecha (no es lo que predomina en el país) en suelos con riesgo de erosión permite desarrollar algunos cultivos (García, 2010). Actualmente la tecnología de siembra directa ha sido adoptada en forma generalizada en la agricultura. Con esta tecnología se siembra más del 85% de la superficie agrícola (MGAP- DIEA 2008; 2009). La combinación de siembra directa y utilización de variedades genéticamente modificadas ha aumentado significativamente el uso de herbicidas totales. Se está dando en los últimos años una disminución de la rotación de cultivos con pasturas, tendiendo a sistemas de agricultura continua, lo que conspira en contra de la conservación del recurso suelo.

Al respecto, según García (2009), la agricultura basada en la soja como principal cultivo, eliminando a las pasturas de la rotación, aún en sistemas con siembra directa, genera una alta proporción de suelo desnudo y riesgo de erosión. Para Díaz et al. (2009), el proceso de intensificación agrícola de los últimos años genera incertidumbre sobre la sustentabilidad de los nuevos sistemas productivos, fundamentalmente por el impacto sobre el recurso suelo.

A los acelerados cambios en la economía mundial de las últimas décadas, se ha agregado en los últimos años un crecimiento de los precios internacionales de los productos básicos, incluyendo los productos agropecuarios. A partir del año 2003 se da un crecimiento en la producción del sistema agropecuario nacional; con el aumento de la productividad asociado y la incorporación de innovaciones tecnológicas y la expansión del área cultivada en suelos de menor potencial agrícola. (Buxedas, 2007).

Estas nuevas tendencias de intensificación del uso del suelo que se están dando en forma progresiva conducen a aumentar el riesgo de erosión, degradación y pérdida de fertilidad, lo cual exige aplicar un manejo responsable de los cultivos y sistemas de producción para mitigar los procesos de degradación y erosión del suelo.

Esta tendencia de mayor actividad agrícola, monocultivos, sistemas productivos con creciente utilización de insumos químicos, y disminución de rotación con pasturas, puede traer problemas en la sustentabilidad ambiental, impactando negativamente en la conservación de los recursos naturales en general y en los suelos en particular.

Evaluar el incremento en el área de la superficie de las cárcavas, identificar los factores que inciden en la génesis y en el desarrollo de la erosión utilizando herramientas de teledetección y sistemas de información geográfica (SIG) y comprender los complejos procesos que afectan a las tierras agrícolas del país, fue lo que motivó la realización de este trabajo.

III.- ASPECTOS TEÓRICOS

3.1.- Definición de cárcava

Las cárcavas son canales o zanjas producidas por la erosión hídrica que reflejan perturbaciones que se producen en la dinámica morfológica del paisaje. (Darby y Simon, 1999). Para Viers, (1983), las cárcavas son estrechos canales de escurrimiento separados por interfluvios agudos o por cortes convexos denudados y que, a partir de desagües espasmódicos durante eventos de aguaceros, generen un transporte de materiales por arroyada. El resultado es el desmoronamiento y demolición de las pendientes. Constituyen una forma común en el modelado de vertientes en el dominio climático templado húmedo y bajo condiciones de erosión activas, este se manifiesta en forma de abarrancamientos; este fenómeno es producto de un proceso geomorfológico más complejo que determina la formación de cárcavas.

Poesen (1993) define una cárcava como aquel canal resultante de la erosión causada por un flujo intermitente de agua durante o inmediatamente después de fuertes lluvias. Estos canales son lo suficientemente profundos como para no poder ser tapados por el agricultor e interfieren a menudo en las operaciones de labranza. Según Osterkamp (2008), la erosión en cárcava consiste en el vaciado de las partículas del suelo o sustrato por un flujo concentrado que da lugar a estrechas incisiones, de mayor tamaño y profundidad que un reguero, y que generalmente llevan agua sólo durante e inmediatamente después de fuertes precipitaciones

Las cárcavas son cursos de agua relativamente permanentes con paredes empinadas, que conducen efímeros flujos durante las tormentas; se caracterizan por tener una cabecera y diferentes resaltos a lo largo de su curso. Estos rápidos cambios de pendiente alternan con secciones de gradiente muy suave ya sean rectas o ligeramente convexas a lo largo de su perfil. Presentan un comportamiento muy errático, por lo que las relaciones entre descarga de sedimentos y la escorrentía son frecuentemente pobres (Hede 1975). Las cárcavas están casi siempre asociadas a una erosión acelerada y, por lo tanto a paisajes inestables.

3.2.- Factores incidentes (condicionantes)

Los factores que condicionan el desarrollo e intensidad del proceso son muy diversos y en ocasiones se encuentran íntimamente relacionados entre sí. La combinación de distintos factores morfométricos, físicos y antrópicos permite comprender las causas de la extensión de las cárcavas producto del incremento de los efectos erosivos, señalando que el comportamiento evolutivo de las cárcavas demuestra una incidencia diferencial al integrar la morfometría con las variables físicas y ambientales. Por lo que, para comprender la dinámica de cada cárcava como paso previo a la modelización con fines explicativos, es necesario realizar un estudio particularizado en el que se integren las variables para cada caso. (Pesce, 2009).

Poesen et al. (2003) definieron la pérdida de suelo debida a la formación de cárcavas como una función multivariable, que expresaron de la siguiente forma: $E_c = f(G, S, U, C, T)$, donde: E_c es la erosión por cárcava, G es el tipo de cárcava, S representa las propiedades del suelo y el sustrato, U el uso y manejo del mismo, C es el clima y T es la topografía. El primero de los términos de la ecuación anterior refleja el tipo de cárcava. La segunda variable recoge las características del suelo y el sustrato (S). La cantidad de suelo erosionado en una determinada localización está íntimamente relacionada con las propiedades físico-químicas del suelo (Evans, 1993). Dichas propiedades pueden determinar los patrones espaciales y la densidad de desarrollo de redes de cárcavas (Bull y Kirkby, 1997). La separabilidad de los suelos, y por tanto, su disposición a ser erosionados, está controlada por la textura de los mismos, la estabilidad de sus agregados y su resistencia al esfuerzo cortante (Arulanandan et al., 1975). La presencia de determinados elementos en la superficie del suelo como por ejemplo fragmentos rocosos resulta una protección frente a los procesos de formación de cárcavas (Poesen et al., 1999).

Valentin et al. (1999) comprobaron como la presencia de costras superficiales provocó una disminución en la pendiente umbral necesaria para la iniciación de regueros. Sin embargo, su

efecto sobre la formación de cárcavas, puede resultar ambivalente, ya que también contribuye a aumentar la cohesión superficial del suelo y por tanto su resistencia al flujo.

La distribución vertical de diferentes capas u horizontes controla en gran medida el tamaño de la cárcava y más específicamente la profundidad y morfología de la sección de la misma (Ireland et al., 1939; Poesen et al., 2003). De este modo, la existencia de un horizonte argílico de acumulación de arcillas del tipo Bt puede desempeñar un papel fundamental en el desarrollo de la cárcava, impidiendo su profundización en el perfil de suelo. Otros horizontes del tipo fragipans, horizontes petrocálcicos o sustratos de roca madre no erosionable funcionan como límite a los procesos de acaravamiento. La presencia de horizontes subyacentes de baja permeabilidad puede favorecer el desarrollo de procesos de acaravamiento induciendo una presión positiva del agua de los poros en los horizontes superiores y disminuyendo la resistencia a la erosión de estos horizontes superficiales (Moore et al., 1988).

De la misma forma estudios realizados en Uruguay (Sganga, 1999) concluyen que la gran mayoría de las cárcavas se han iniciado en sitios frágiles, donde las concavidades presentan pendientes significativas, con Planosoles o suelos que funcionan como tales: Argisoles con horizonte álbico discontinuo, Luvisoles álbicos y otros suelos de gran diferenciación. Según la MGAP-DSA, 1976, cuando el Planosol es sódico o tiene muy baja estabilidad estructural, el riesgo de formación de cárcavas es máximo, aunque el Planosol ocupa solamente la parte media y baja de la ladera cóncava, la cárcava se inicia en el y crece subiendo la cuesta y afectando los suelos en posición superior: Argisoles, Brunosoles, Vertisoles, etc. En este proceso, el Planosol donde se originó tiende a desaparecer. Por el contrario suelos con poca o sin diferenciación, franco arcillosos, con fuerte estabilidad estructural (dado su alto contenido en materia orgánica y calcio), con conductividad hidráulica rápida y localizados en un padrón sin Planosoles en ladera cóncava tienen una gran resistencia a carcavarse (baja erodabilidad en cárcavas).

Otro aspecto importante que ha sido señalado en la literatura son las relaciones entre el suelo y el fluido que ocupa los poros. Así pues, la composición química del fluido puede generar modificaciones en las características de agregación del suelo (Sargunam et al., 1973). En las arcillas, modificaciones del Na disuelto en relación con otros cationes básicos del agua de los poros pueden ayudar a dispersar las partículas de suelo (Sherard et al., 1972).

3.2.1.- Factores MORFOMÉTRICOS

Con respecto a las variables morfométricas, existen una gran variedad de estudios e índices morfométricos, fruto del interés que se mostró por los mismos para cuantificar los procesos de erosión que tienen sus orígenes a mediados del siglo XX en Estados Unidos (Horton, 1945; Miller, 1957) y en los años 80 e incluso más recientemente (Sala y Gay, 1981; Antigüedad, 1982; Julián y Tamés, 1983; Eraso, 1983; Jardí, 1985; Vidal-Abarca et al, 1987; Sánchez, 1990; Senciales, 1999).

Estos índices tienen como objetivo parametrizar la cuenca y a partir de las figuras geométricas resultantes compararlas con modelos teóricos pre-establecidos para determinar el modo de escurrimiento que tienen e inferir el mayor o menor riesgo de erosión, por lo que los valores correspondientes a la morfometría de la cuenca constituyen una aproximación numérica sobre la dinámica del proceso erosivo.

Para Senciales, (1999). “(...) cuencas más alargadas tienden a una respuesta más difusa en comparación con las respuestas a tormentas de caudales altos en cuencas compactas. Esto se debe a que la escorrentía que drena los límites de una cuenca compacta tiene distancias similares de trayecto desde todos los cuadrantes y llega al colector principal al mismo tiempo, mientras que en cuencas de forma alargada, al agua le cuesta bastante más tiempo circular desde la parte alta de la cuenca hasta el final.”

Ward y Robinson (2000), sostienen que: la forma de la cuenca y el modelo de drenaje se combinan para influenciar en el tamaño y forma de los picos de las crecidas a la salida de la cuenca. Las cuencas más alargadas tienden a una respuesta más difusa, en comparación con las respuestas de tormentas de caudales altos en cuencas compactas. Esto se debe a que la escorrentía que drena los límites de una cuenca compacta tiene distancias similares de trayecto desde todos los cuadrantes y llega al colector principal al mismo tiempo, mientras que en cuencas de forma alargada al agua le cuesta bastante más circular desde la parte alta de la cuenca hasta el final. Así pues, la forma de la cuenca y el modelo de red de drenaje se combinan para influenciar en el tamaño y forma de los picos de crecida a la salida de la cuenca y en función de ello la erosividad del flujo.

Trabajos morfométricos realizados por Senciales (op.cit) demostraron que los menores valores de la razón de elongación se dan en áreas de baja pendiente y con tendencia a la meandrización en los cauces fluviales. Mientras que Gregory y Walling (1973), señalaron que cuanto más circular tienda a ser la forma de una cuenca, más retardo existe entre el momento de la precipitación y el momento de crecida en la desembocadura, pero al mismo tiempo, más acusada y súbita es la crecida y por lo tanto más alto el riesgo de inundación en el desagüe y de erosión en las pendientes.

Para Pesce (2009), las principales variables descriptivas representativas que se vinculan con los procesos de erosión del Factor Morfométrico son: el Índice de Circularidad (I.C), la Razón de Elongación (R.E) y el Factor. Forma (F.F).

3.2.2.- Factores FÍSICOS

Con respecto a las variables físicas de las microcuencas que promueven la erosión, están vinculadas con la topografía, con la red de drenaje y con las características ecológicas del territorio (Chorley, 1971; Soczynska, 1991; Pesce, 2009). El análisis de las variables físicas permite deducir, en una primera instancia, la interacción entre el sistema fluvial y las demás

características ambientales del territorio de la cuenca, tales como la geología y su estructura, la energía del relieve, la estructura y permeabilidad de los suelos, la vegetación dominante y los usos del suelo que están explicando los procesos de erosión. (Ward y Robinson, 2000).

La morfología de la red hidrográfica, la densidad de drenaje y la jerarquización del sistema fluvial constituyen parámetros fundamentales que sintetizan caracteres geológicos, geomorfológicos, bióticos y antrópicos característicos de un territorio y son una primera aproximación a la erodabilidad del mismo (Senciales, 1999).

A su vez, González de Matauco (2004) sostuvo que la red de drenaje desde una perspectiva ecológica, es un ejemplo de auto organización. La morfología de la red, la densidad de drenaje y los órdenes jerárquicos alcanzados son parámetros fundamentales de estudio que dependen de los caracteres geomorfológicos y bióticos del sistema y su función es el transporte de materia y energía en el interior de la cuenca, dado que la misma es una unidad espacial compuesta de una gran diversidad de componentes bióticos y abióticos que interactúan entre sí.

Desde el punto de vista hidrológico una cuenca se define como el territorio que ocupa el río principal y sus afluentes, cuyos límites son definidos por la topografía del terreno a partir de las divisorias de aguas. (Achkar et al, 2004).

La topografía también resulta determinante en los procesos de formación de cárcavas (Patton y Schumm, 1975), las características geométricas del terreno influyen directamente sobre la capacidad erosiva del flujo: la pendiente provoca la aceleración o deceleración del flujo y la concavidad o convexidad de la superficie favorece la concentración o dispersión del flujo. La topografía también determina el área vertiente hacia un punto y por tanto la cantidad de agua que recibe cada zona dentro de una cuenca. El efecto conjunto del área de drenaje, como sustituta del caudal, y de la pendiente, ha llevado al análisis de la iniciación y desarrollo de cárcavas como un fenómeno de umbral topográfico.

En el departamento de Canelones, Uruguay (DSA-MGAP, 1982, 1985), la presencia de erosión severa, con abundante presencia de cárcavas se observa en las unidades de colina y valles fuertes (pendientes 6 a 12%), sobre suelos del cretáceo y cristalino, en lomadas fuertes (3,5 a 6 %) sobre diversas litologías y hasta en lomadas (2,5 a 3,5%) de la Formación Libertad, por lo que se puede asumir que 2,5% de pendiente es el umbral inferior, para su aparición, en la mayoría de las situaciones. Para Pesce (2009), las principales variables descriptivas representativas que se vinculan con los procesos de erosión del **Factor Físico** son: el Área, la Jerarquía de Evacuación Fluvial (Strhaler), el Coeficiente de Rugosidad y la Pendiente Media.

3.2.3.- Resistencia del suelo a la Penetración

Según la bibliografía, la variable **Resistencia del suelo** es considerada como representativa del factor físico y de las características estructurales de los suelos, (considerando que es buen indicador de: porosidad, grado de aireación y capacidad de drenaje) de la microcuenca en la que se inscriben las cárcavas, y que inciden en la expansión (“remonte”) y cambios en las direcciones de avance de cada una de las cabeceras de la cárcava en estudio. Según Barraclough et al., (1991), las medidas de densidad aparente, macroporosidad y penetrabilidad son índices indirectos del estado estructural del suelo. La resistencia a la penetración es, junto con la porosidad, la variable más importante en los estudios sobre la compactación del suelo en relación con el enraizamiento

Compactación de suelo

Un suelo con óptimas condiciones para el desarrollo vegetal presenta una elevada estabilidad estructural, esto significa condiciones favorables para la entrada y movimiento del agua y aire en el perfil, buena transferencia de calor, y una alta capacidad de retención hídrica por parte del suelo. La no presencia de limitaciones para el desarrollo radical es también una consecuencia de un buen estado estructural.

Kay (1990) definió los siguientes indicadores de calidad estructural de un suelo: forma, estabilidad y resiliencia de la estructura edáfica. Forma estructural de un suelo: describe el ordenamiento heterogéneo de la fase sólida y el espacio poroso que existe en un suelo en un momento dado. Se relaciona estrechamente con aspectos morfológicos. Estabilidad de la estructura se refiere a la capacidad que posee un suelo para conservar el ordenamiento de sólidos y espacio poroso cuando está sujeto a diferentes disturbios externos. Resiliencia se refiere a la capacidad de un suelo determinado para recuperar sus atributos originales luego de un disturbio. (p. ej. pisoteo, labranzas, etc.) Según Taboada y Alvarez (2008), las causas más frecuentes de la compactación de suelos se pueden clasificar según su origen en: Naturales: Se producen sin la intervención del hombre en el ecosistema a) compresión natural de las partículas del suelo durante los procesos de formación de los mismos. b) contracción natural por los procesos de humedecimiento-secado del suelo. Inducidas: Son consecuencia directa de la intervención del hombre en el ecosistema a) Pisoteo de animales. b) Tránsito de maquinaria. c) Acción del agua en esquemas de riego por aspersión o inundación.

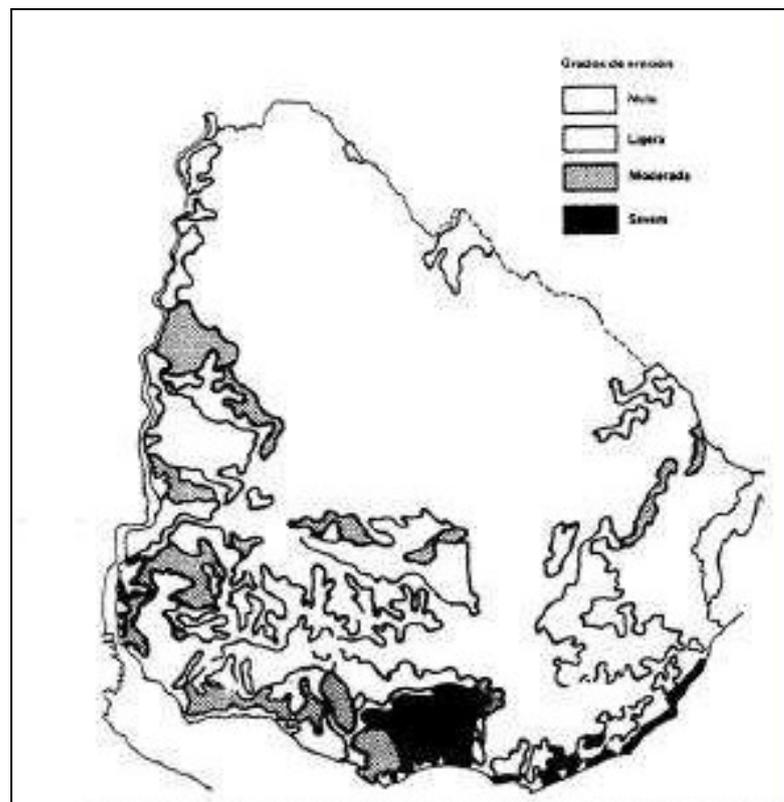
Cuantificación de la compactación

La resistencia a la penetración es, junto con la porosidad, la variable más importante en los estudios sobre la compactación del suelo en relación con el enraizamiento son índices indirectos del estado estructural del suelo. (Barraclough et al., 1991). La medida de la **Resistencia a la Penetración**, se toman como índice de la resistencia mecánica que ofrece el suelo al crecimiento radicular, lo cual depende de la magnitud del espacio poroso grueso, y su rigidez, la que es afectada por el contenido de humedad del suelo. El proceso de compactación modifica el estado de agregación del suelo y las interacciones entre sus fases sólida, líquida y gaseosa, debidas al incremento de la densidad aparente (DA) y de la resistencia mecánica del suelo (RM). Esto afecta la acumulación y el suministro de agua y de aire a través de la disminución de la porosidad, de la tasa de infiltración y de la capacidad de retención hídrica (Bayhan et al., 2002).

3.2.4.- Factores ANTRÓPICOS

La Figura 1 muestra la erosión edáfica en Uruguay. Como se aprecia la zona más afectada es la región centro, y NE de Canelones, así como también algunas zonas del litoral y este del país. Si bien esta información tiene más de 30 años de generada (Cayssials, Liesegang, y Piñeyrúa, 1978) actualmente no hay evidencias de que haya una variación importante.

Figura 1.- Uruguay, intensidad del proceso erosivo.



Fuente: Cayssials, Liesegang, y. Piñeyrúa, 1978.

El tipo de uso de suelo, determina, entre otros factores el comportamiento hidrológico del terreno sobre el que se extiende. En entornos rurales, cada forma de explotación da lugar a una cubierta vegetal específica. Estudios realizados en Nuevo Mexico por Rich en 1911, ya habían denotado la importancia que las modificaciones de la cubierta vegetal tienen en el desarrollo de arroyos y Rey et al., (2004), concluyeron que la capacidad de la vegetación para proteger el suelo es muy variable en función de su densidad y morfología.

Estudios más recientes (Poesen et al., 2003) han abordado el impacto que tiene un cambio gradual o repentino en el uso del suelo sobre los procesos de erosión por cárcavas bajo diversas condiciones ambientales. Mientras Harvey (1996) habló de un desarrollo de cárcavas durante los siglos IX y X en el Reino Unido propiciado por un cambio en la cubierta vegetal inducido por el hombre y Bork et al. (1998) atribuyeron el crecimiento de grandes sistemas de cárcavas durante el siglo XIV en Europa central a la elevada presión humana sobre el suelo junto con algunos eventos de precipitación de carácter extremo.

Kasai (2006) atribuyó a la deforestación excesiva llevada a cabo durante los últimos siglos en Nueva Zelanda, la aparición de mayores formas de erosión, entre ellas, grandes cárcavas. Prosser y Winchester (1996) relacionaron el desarrollo de sistemas de cárcavas en Australia durante los últimos 200 años, con el proceso de colonización europeo.

El sobrepastoreo, ha sido señalado también, en algunos trabajos como causa principal de la aparición y desarrollo de cárcavas en zonas de pastoreo de Ecuador (Podwojewski et al. 2002), de Nueva Zelanda (Gómez et al 2003), de Etiopia (Nyssen et al., 2004) en la isla chilena de Rapa Nui (Mieth y Bork, 2005), en zonas agrarias de Italia (Zucca et al. 2006) y también en el SO de España Gomez Gutierrez et. al (2009)

3.3.- Procesos y dinámicas de las cárcavas

Los sistemas de cárcavas son una de las expresiones más evidentes de los procesos erosivos, sin embargo son también de las formas menos estudiadas de modo sistemático. Se conoce poco respecto a su origen, nucleación y evolución; y muchas veces se acepta que su evolución no es predecible. Para Morgan, 1997, el juego de umbrales intrínsecos y extrínsecos hacen de la erosión en cárcavas un proceso extremadamente complejo. No es sorprendente que permanezca poco conocido y que solo se hayan obtenido apreciaciones cualitativas de los factores que influyen en el comportamiento de una cárcava.

[Wilson et al. \(2008\)](#) reportaron que el fenómeno erosivo que afecta la extensión de la superficie de las cárcavas es producto de la combinación de la erosividad de las precipitaciones con el poder erosivo causado por el patrón de escurrimiento.

Según la literatura especializada, las principales causas de la formación de cárcavas serían: cambios de uso del suelo, uso inadecuado de laderas, caminos no protegidos, hábito subterráneo de roedores, prácticas inadecuadas de laboreo, pérdida de la resistencia del suelo a la erosión, aprovechamientos forestales no controlados, sobrepastoreo, ruptura de obras aguas arriba, lluvias de alta intensidad, suelos susceptibles a la erosión en canalillos, áreas de drenaje compactas donde se concentran en forma rápida los escurrimientos.

Los sistemas de cárcavas, tal como cualquier sistema erosivo en el momento de entrar en contacto con obras humanas se vuelve de interés, sin embargo cuando el problema de la forma y evolución son de difícil comprensión se prefieren medios más indirectos de análisis; habitualmente tratando el problema desde el ángulo de los indicadores (índices) ([García-Hidalgo, J. F. et al 2006](#))

3.3.1.- Procesos de aparición

En términos de la ingeniería hidráulica, las cárcavas tienen su origen en la ruptura de un estado de equilibrio dinámico y meta estable en la cuenca. La erosión en cárcavas ocurre cuando un curso de agua natural se aparta de su estado de equilibrio meta estable. Un curso de agua procura alcanzar siempre un equilibrio entre el tamaño del canal de desagüe, su forma, gradiente y la cantidad de agua que discurre por él. Si la situación cambia ligeramente por una fuerza exterior, el cauce tenderá a volver a su posición de equilibrio meta estable. Así el caudal máximo aumenta, se ensancha el canal de desagüe o aumentará el gradiente, hasta que se alcanza un nuevo equilibrio. Pero la corriente, solo puede recuperar su posición original después de pequeñas perturbaciones y si la corriente recibe un cambio demasiado grande, empieza la cárcava y requiere de un esfuerzo mucho mayor para devolverla a la posición primitiva. ([Hudson, 1982](#)) Por lo tanto,

la formación de una cárcava es un proceso gobernado por las características del flujo concentrado. Dicho proceso, es tratado generalmente como un fenómeno de umbral (Knapen et al., 2007), es decir, el arranque de partículas del suelo se produce cuando el flujo supera su umbral de resistencia.

La evolución del conocimiento sobre la génesis de estas geoformas, podemos dividirla en el transcurso del tiempo, en tres etapas o generaciones. Una primera generación donde predominó la creación y desarrollo de modelos empíricos; una segunda generación de ecuaciones y modelos predictivos para la estimación del arranque de partículas por flujo concentrado (Knapen et al., 2007) y por último, una tercera generación representada por los modelos que tratan de incorporar un componente estocástico en sus formulaciones (Sidorchuk, 2005) y que completan la evolución del conocimiento hasta la actualidad.

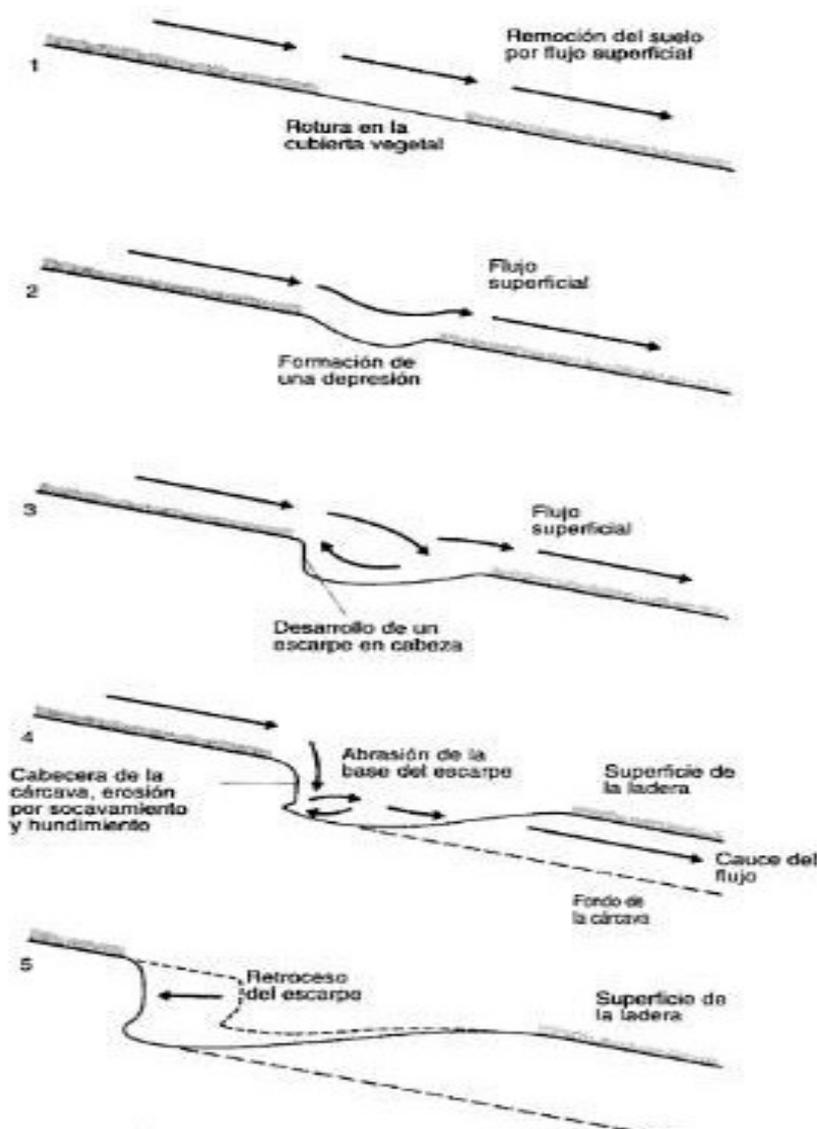
Según Patton y Schumm, 1975, la aparición de cárcavas como consecuencia de la circulación de flujo concentrado se relaciona con la superación de un umbral de tipo geomorfológico debido a una disminución en la resistencia de las fuerzas que mantienen unidas las partículas de suelo, a un incremento en la fuerza erosiva del flujo, o a ambos (Bocco, 1991). Este umbral puede ser **extrínseco**, bien de tipo climático (Huntington, 1914) o bien de tipo antrópico (Dodge, 1902), o **intrínseco** e inherente al propio sistema de la cárcava y consecuencia de procesos geomorfológicos y sedimentológicos naturales dentro del canal. (Patton y Schumm, 1975)

La formación de una cárcava por flujo superficial frecuentemente aparece ligada a un incremento en la escorrentía. Dicho incremento, puede deberse a varias causas: cambios en el uso del suelo, modificaciones en el área de drenaje motivadas por el hombre (Downes 1964, Nyssen et al., 2002), eventos de precipitación de características extremas, etc.

Algunos trabajos han señalado la posibilidad de que una cárcava represente un estado evolutivo avanzado de un reguero (FAO, 1965), sin embargo varios autores señalan que su génesis suele ser un proceso mucho más complejo. (Morgan, 1997)

Otros investigadores han descrito la aparición de cárcavas por la acción de flujo concentrado superficial sobre pequeñas depresiones del terreno (originadas como consecuencia de sobrepastoreo, incendios, etc.) que con el tiempo terminan conectándose para formar un cauce incipiente (Leopold et al., 1964). A continuación se pueden ver las etapas en la formación de una cárcava en la superficie de una ladera según Leopold, Woldman y Miler (1964).

Figura 2.- Etapas de la formación de una cárcava



Fuente: Leopold, Woldman y Miler 1964.

Una vez formada, una cárcava puede continuar creciendo y generando sedimentos aunque las causas que motivaron su aparición cesen (Valentin et al., 2005).

Figura 3.- Dimensiones de una cárcava



Cárcava N°10, San Jacinto Canelones

3.3.2- Procesos de desarrollo

La pendiente, las características del suelo y subsuelo en que se inscriben, el padrón de drenaje superficial y subsuperficial natural o antrópico, la cuenca de captación y la cobertura vegetal relacionada al uso del suelo, son las determinantes fundamentales en relación a la expansión y dimensiones que alcanza una cárcava individual o un padrón de cárcavas. (Sganga, 1999). Las cárcavas evolucionan creciendo longitudinal, vertical y lateralmente, con entrantes que le ganarán espacio al terreno durante las épocas de lluvias con poder erosivo; es en esas circunstancias cuando se habla del avance de las cárcavas (Valentin et al. 2005; Santiago, 2007).

El crecimiento de una cárcava puede producirse a través de tres mecanismos principales: el crecimiento aguas arriba de su cabecera, el ensanchamiento del cauce y su profundización. FAO (1967) describe el crecimiento de las cárcavas como el resultado de diferentes procesos, los cuales actúan o bien aislados, o bien en combinación, así:

- Erosión por el agua que precipita en la cabecera y que ocasiona la regresión progresiva de ésta.
- Desmoronamiento en lados de la cárcava por la acción lubricante de las aguas de infiltración.
- Frotamiento en el fondo o en los lados de la cárcava por la corriente de agua y las materias abrasivas (partículas de suelo o restos que arrastra el agua).

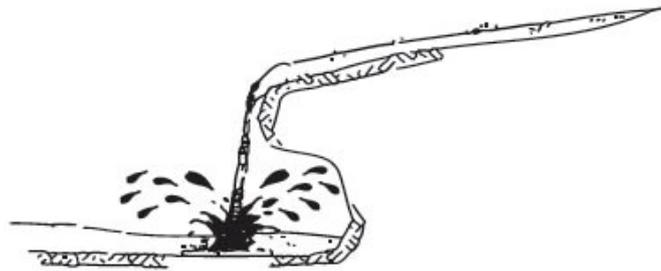
Crecimiento aguas arriba de su cabecera

Las cabeceras de las cárcavas, son el mejor indicador del estado de actividad. El avance de la cabecera, determina su crecimiento en longitud y consecuentemente en todas sus dimensiones, ancho y profundidad. La cárcava crece “remontando la ladera”, hasta agotar su capacidad de captación de agua (minimiza la vertiente), por lo que su máxima longitud potencial, esta dada por la que existe entre el talweg del valle y la divisoria de aguas. (Sganga 1999)

Según Piest (1975) y Bradford (1977), la estabilidad estructural del suelo y su conductividad hídrica, así como el caudal del flujo erosivo del agua, determinan avances diferentes de las cabeceras, relacionaron la morfología de la cabecera y los derrumbes que en ella se producen con el nivel freático, las diferencias de humedad en el suelo y los flujos que tienen lugar en su interior. Thompson (1964), sostiene que el avance de las cabeceras, depende del drenaje del área, la precipitación y el tipo de suelo. Por su parte, Bradford (1973), sostiene que la estabilidad de las paredes de una cárcava, está afectada por la profundidad de las napas freáticas, la cohesión del suelo dependiente de los grados de sequedad-humedad y de la tasa de infiltración. La humedad del suelo, reduciendo la cohesión y provocando fenómenos de expansión es un factor importante, aún más que la infiltración y el escurrimiento según Piest (1979). Este autor (1975), indica que un aumento de la infiltración, cuando hay circulación subsuperficial, no representa claramente una disminución en el avance de una cárcava.

Cuando el flujo salva el escarpe de la cabecera, se produce un continuo remolino sobre la base del mismo que da lugar a su socavación, la parte superior del muro colapsa y se derrumba sobre el fondo del canal. Este material colapsado, puede ser evacuado inmediatamente tras el derrumbe si existe flujo en el canal y éste dispone de energía suficiente para transportarlo, o por el contrario, puede permanecer en el fondo del cauce a la espera de que se produzca un flujo con suficiente energía.

Figura 4- Crecimiento “remontante” de cabecera



Cuando el material de la base del escarpe es evacuado, comienza de nuevo la socavación de su base, produciéndose de esta forma, el avance aguas arriba de la cabecera. El derrumbe de los bordes de la cabecera se produce, principalmente por la energía asociada al agua. [Piest y col. \(1975\)](#) encontraron que todas las cárcavas que tenían avance por cabecera se correspondían con un sistema de canales cercano a ellas. Estos flujos de agua que llegan no sólo son capaces de producir un gran crecimiento de la cárcava, sino que tienen la fuerza suficiente para producir en ellas el desplazamiento de los sedimentos. Sin embargo, cuando las cárcavas compiten con otras por el drenaje de la cuenca tienen un crecimiento más lento en el tiempo ([Faulkner,1995](#)).

Estudios realizados en Uruguay por [Sganga \(1999\)](#) durante 3 años (1995-1998), sobre el avance de las cabeceras en cárcavas de características similares, inscriptas en cuencas pequeñas (menor a 2 ha) pero en suelos diferentes: a) Brunosol Subéutrico Típico LAc bien estructurado y sin drenaje subsuperficial y b) Planosol Subéutico Melánico LAc débilmente estructurado y con drenaje subsuperficial. Determinó que los avances se dan por una pérdida lenta y homogénea de materiales (promedio 1,4 cm/mes en a) y en b) 2,36 cm/mes y una brusca pérdida (momento de fractura), en que el bloque debilitado en la cabecera de la cárcava, cae en forma instantánea. En el caso a) parece existir una mayor relación entre ese momento de colapso y un alto nivel de precipitaciones. Este debilitamiento se debe al socavamiento provocado por la turbulencia del agua. La alternancia de períodos secos, en que el suelo se resquebraja y posteriores avenidas de agua, van pautando este fenómeno.

La erosión del canal se debe al ensanchamiento y profundización del cauce:

Ensanchamiento del cauce

Aunque depende de las características de la cuenca en que se inscriben, el ancho es mínimo en la cabecera y máximo en la base de la cárcava (Sganga 1999). La importancia de la erosión sobre las márgenes aguas abajo de la cabecera también ha sido estudiada por varios autores (Bradford, 1973, 1978; Piest et al., 1975; Blong et al., 1982; Bocco 1991; Bull y Kirkby, 1997; Sganga, 1999; Simon et al., 2000). Las propiedades físicas del material que compone las márgenes de la cárcava, así como la geometría de las mismas, la pendiente y la resistencia de los suelos son fundamentales en este proceso. Los crecimientos laterales, en la parte alta y en lecho de la cárcava se deben a que el agua, a medida que va descendiendo por la ladera y debido a las irregularidades en el terreno, se va concentrando en la parte alta, a lo largo de la cárcava y en el lecho de la misma originando su crecimiento. La estabilidad de las paredes de una cárcava, esta afectada por la profundidad de las napas freáticas, la cohesión del suelo dependiente de los grados de sequedad-humedad y de la tasa de infiltración Bradford (1973). Según este autor (1978), el crecimiento de una cárcava, depende de la capacidad de carga de sedimentos del agua que escurre dentro de ella, si el agua tiene la energía suficiente para arrastrar los materiales caídos en la cabecera, se pueden observar crecimientos rápidos de la cárcava. De la misma manera Piest (1975) citado por Sganga (1999), concede gran importancia a la “limpieza” por las aguas de escurrimiento, de los materiales caídos de los terraplenes en el crecimiento de una cárcava.

Simon et al. (2000) relacionaron la erosión de las márgenes con la variabilidad en la presión del agua de los poros del suelo, causada a su vez por los diferentes flujos de agua dentro del mismo. La generación de presiones positivas del agua de los poros favorecidas por la filtración de agua a lo largo del perfil, resultaron en un descenso de la resistencia al esfuerzo cortante en las márgenes. Mientras, presiones negativas del agua de los poros provocaron un incremento en la resistencia de las márgenes. Según este autor la inestabilidad de las márgenes se relaciona con: a) un incremento en el peso específico del suelo, b) un descenso o pérdida de la matriz de succión y por tanto una pérdida de la cohesión de la pared, c) la generación de presiones positivas del agua de los poros y por tanto una pérdida en la resistencia al esfuerzo cortante de la pared, d) erosión del material colapsado en la base de la pared y e) pérdida de la presión de confinamiento durante el flujo de recesión. Cuando los bloques colapsados permanecen al pie de la pared

actúan como protectores del talud evitando la acción directa del flujo sobre el pie del muro. Estos colapsos pueden ser erosionados por flujos de pequeña magnitud y relativamente frecuentes durante el invierno, manteniendo las márgenes con paredes verticales y propiciando largos períodos de retroceso con elevadas concentraciones sedimentarias en el flujo. El ensanchamiento de una cárcava debido al continuo colapso de sus márgenes puede representar el principal proceso de crecimiento del canal y además [Simon et al., \(2000\)](#), encontraron que el proceso de ensanchamiento de las márgenes suele mostrar cierta estacionalidad, concentrándose durante los períodos prolongados de humedad en el suelo combinados con precipitaciones. En los paisajes de Uruguay, se puede observar en muchas cárcavas como el ancho se hace máximo, con gran estabilización del fondo por la vegetación, continuando el proceso a nivel de los flancos, que configuran escalones de erosión “remontante”, en las laderas.

Profundización del cauce

Según [Sganga \(1999\)](#), la profundidad es menor en las posiciones bajas de la ladera y mayor en las altas y guarda una relación directa con la pendiente. El crecimiento de la cárcava se produce al circular agua por ella, lo que provoca la eliminación de materiales en su base originando una profundización del lecho. El mecanismo de profundización del cauce, está gobernado por las características del flujo que circula por el canal. Además, a la cantidad de material arrancado directamente del lecho por la acción del flujo concentrado, hay que añadir la abrasión que se produce si el flujo transporta carga de fondo.

A lo largo del cauce, el proceso de ensanchamiento se combina con el ahondamiento del canal para ajustar la forma de la sección. Dicho ajuste se realiza dentro de unos constreñimientos adicionales impuestos por la composición del borde ([Huang y Warner, 1995](#)), la vegetación de las márgenes ([Charlton et al., 1978](#)) y la pendiente del valle. La cohesión de las márgenes, no puede ser expresada como una simple función de alguna propiedad de los materiales que la componen, aunque se han realizado algunos intentos de relacionarla con la presencia de arcilla y limo ([Schumm, 1971](#)).

La diferencia entre el fondo de la cárcava y la superficie del terreno varía, al mantenerse esta última constante y tender el piso al equilibrio horizontal ([Hudson, 1982](#)). En busca de este equilibrio, es común observar la inscripción de una segunda y tercera cárcava en el fondo de una anterior. La friabilidad de los materiales del suelo y subsuelo, condicionan estas variaciones en profundidad.

Para crecer, una cárcava necesita agua de escurrimiento por lo que, el tamaño de la cuenca y los factores de escorrentía (vegetación, uso, relieve, velocidad de infiltración y permeabilidad del suelo) se relacionan a la expresión del fenómeno. (Sganga, 1999). Se entiende que tiende a existir una relación directa entre la profundidad y el tamaño de la cuenca. Riley (1991), en Australia estudió el fenómeno, determinando el umbral de aparición de la cárcava en el paisaje, relacionándolo a la pendiente y al tamaño de la cuenca.

3.3.4.- Formas resultantes

A continuación se describen algunas de las tipologías de cárcavas desarrolladas en la literatura, según diferentes criterios: su forma en planta, la forma de la sección transversal, por su tamaño (profundidad y área de drenaje) y/o por su continuidad a lo largo de la pendiente, por su posición topográfica, si pueden ser eliminadas por los procedimientos habituales de laboreo (efímeras o permanentes), por el sistema de drenaje (continua o discontinua) o por el proceso principal que les dio origen, entre otros.

Tabla I.- Diferentes criterios de clasificación de cárcavas

Criterio	Tipología	Descripción	Fuente
Profundidad	incipientes	0.2 a 0,5 m	DSA-Prenader (1998) Carta Nacional de Erosión Antrópica
	algo profundas	0,5 a 1 m	
	profundas	> 1 m	
Tamaño de su cuenca	grandes	> 20 ha	Suarez de Castro (1980)
	medianas	de 2 a 20 ha	
	pequeñas	< 2 ha	
Profundidad	profundas	> 5 m	Suarez de Castro (1980)
	medianas	de 1 a 5 m	
	pequeñas	< 1 m	
Si se pueden eliminar con laboreo	efímeras	se pueden eliminar	Foster (1986), Bocco (1991), Casali y col., (1999),
	permanentes	no se puede	
Forma de la sección transversal	tipo "U"	suelos indiferenciados	Suarez de Castro (1980) Martinez et al (2009)
	forma de "V"	suelos diferenciados	
	trapezoidal	sustrato resistente	
Sistema de drenaje	continuas	sistema de cárcavas	Leopold et al., (1964), Heede (1967), Reid (1989) Martinez et al (2009)
	discontinuas	cárcavas aisladas	
Posición topográfica	de ladera		Morgan et al (1969)
	de valle		

Si bien algunos criterios de clasificación son comunes a varios autores, en otros casos como en la evolución y naturaleza de las cárcavas discontinuas no está del todo clara en la literatura. [Leopold y Miller, 1956](#) y [Heede, 1967](#), cuando se refieren a **cárcavas discontinuas**, se refieren a canales con una sección identificable sólo en determinados tramos de su perfil longitudinal. Su morfología discontinua motiva que puedan presentar varias cabeceras a lo largo de su recorrido. Se desconoce si una cárcava discontinua es el estado antecedente de una cárcava continua o si por el contrario se trata de un canal estable con secciones definidas que van migrando aguas arriba y van siendo rellenadas aguas abajo. Por otra parte, [Burchard \(1974\)](#), indica que en el desarrollo de una cárcava se pueden identificar diferentes estados de desarrollo: estados iniciales en que la cárcava es discontinua y estados de madurez, en que se hace continua y con equilibrio dinámico. De la misma forma [Ireland, 1939](#) citado por [Bocco, 1991](#), se refiere a “estadios”, pero en relación a los horizontes del suelo que va afectando al profundizarse y a los procesos de activación y fijación. En cuanto a su forma en planta, [Peralta \(1977\)](#) citado por [Moder \(1983\)](#) las clasifica en:

Tabla II.- Clasificación de cárcavas según su forma en planta ([Peralta, 1977](#))

Forma	Descripción
Lineal	De forma larga y con cabeza angosta, de pocos tributarios en sus costados; puede ensancharse y dar origen a los tipos restantes, asociada al laboreo en el sentido de la máxima pendiente y a la inadecuada canalización del agua.
Bulbosa	Ancha y espatulada en el extremo superior, pudiendo ser lineal en su parte baja; a menudo sigue el curso de un drenaje viejo. Tiene pequeños tributarios en todos los costados; al irse desarrollando da origen a la cárcava de tipo dendrítico.
Dendrítica	Formada por muchos tributarios en forma ramificada; puede originarse siguiendo las líneas de un drenaje natural; su cabeza puede tener forma de semicírculo.
Enrejada	Los tributarios entran al canal formando aproximadamente un ángulo de 90°; se desarrolla principalmente en zonas planas.
Paralela	Compuesta por una o más cárcavas que desaguan en una sola.
Compuesta	Combinaciones de dos o más formas, dándose especialmente en zonas con problemas avanzados de erosión.

La geometría de una cárcava (o sistema de cárcavas) se hace más y más tortuosa a medida que gana tamaño; por consiguiente, aumenta la divergencia de las formas regulares preferibles para el análisis de un cuerpo, por ejemplo no es posible aún aproximar el contorno erosivo de una cárcava a una curva teórica de origen.

Según [Bocco, \(1991\)](#), la distribución horizontal sigue los padrones de drenaje, dependiendo del suelo y su uso y de la naturaleza geológica del subsuelo. En ese sentido, [Sganga \(1999\)](#) en estudios realizados en Uruguay, relacionó las formas dendríticas (ramificadas) de las cárcavas a los sustratos cristalinos alterados; mientras que las formas paralelas o angulosas serían producto de sedimentos homogéneos, con tierras afectadas por erosión antrópica, siguiendo el padrón de laboreo.

A continuación en la Tabla III, se presentan otros criterios empleados para clasificar las cárcavas y las fuentes ordenadas cronológicamente.

Tabla III.- Clasificación de cárcavas:

Fuente	Criterio
Ireland <i>et al.</i> (1939)	Morfología de la cabecera
De Ploey (1973)	Morfología de la sección
Imeson y Kwaad (1980)	Morfología de la sección
Heede (1982)	Estructura de la red de drenaje
Ezechi y Okagbue (1989)	Génesis
Oostwoud Wijdenes (1991)	Morfología y génesis
Morgan (1997)	Posición topográfica
Soufi (2004)	Morfo-climático
Martinez <i>et al.</i> (2009)	Forma de la sección transversal

3.4.- SÍNTESIS DE ASPECTOS TEÓRICOS

Los modelos cuantitativos que explican el avance de las cárcavas (Bocco, 1991; Funes et al., 1996) sostienen que es dependiente del escurrimiento hídrico, por lo que, el tamaño de la cuenca en las que se inscriben geográficamente es fundamental, ya que determina el área de captación hídrica que actúa como uno de los factores erosivos. Es por ello que Seginer (1966) plantea que la extensión de cada cárcava está en estrecha relación con el área de la cuenca, proponiendo la siguiente ecuación: $E = (A) h K$; donde: E = Extensión horizontal de la cárcava; A = Área de drenaje; K y h = Constantes de calibración.

Takahashi et al. (2008) demostraron que el flujo hiporreico en las proximidades de las cabeceras de las cárcavas tiene mayor conductividad hidráulica pero que, en sí mismo no dispondría de la energía suficiente como para acelerar el proceso erosivo sino que se combinan con la escorrentía superficial para incidir en la evolución geomorfológica del cauce. Por lo que la acción erosiva combinada de los flujos de escurrimiento superficial y subsuperficial incrementaría la extensión longitudinal de las cárcavas a partir de los puntos de inflexión o ruptura de las cabeceras, hasta que llegan a su máximo desarrollo, o sea, alcanzan el interfluvio.

Diversos son los métodos que se han empleado para cartografiar los efectos de los procesos de erosión en cárcavas y para predecir el riesgo de erosión y sus implicaciones ambientales, sociales y económicas. El uso de técnicas de teledetección (fotointerpretación de fotografías aéreas e imágenes satelitales) son consideradas como las técnicas más útiles en la cartografía de la erosión por cárcavas (Bergsma 1982, Bergsma 1987, Isss 1996).

En el campo de la modelización, los procesos de la erosión por cárcavas no han sido tan estudiados como los procesos de erosión laminar. Una razón puede ser que los procesos físicos relacionados con la formación y el desarrollo de las cárcavas todavía están poco comprendido (Heede 1976, Imeson y Kwaad 1980, Thomas et al 1986, Zinck 1997).

La falta de conocimiento de los fundamentos físicos de estos procesos de erosión ha fomentado el desarrollo de modelos de base empírica. Muchos de ellos dirigidos a predecir la erosión futura a partir de factores del terreno relacionados con la existencia de estos tipos de erosión en base a relaciones estadísticamente significativas. Se distinguen 3 categorías de modelos dentro de este grupo a) modelos que predicen el desarrollo de las cárcavas existentes a partir de algunas características de la cuenca de drenaje (Thompson 1964; SCS 1966; Seginer 1966; Beer y Johnson 1964 citado por Heede 1976) b) modelos que predicen la aparición de nuevas cárcavas en función de las características del terreno (Stocking 1980, Donker y Damen 1984, More et al 1988, Meyer y Martínez - Casanova 1998); y c) modelos que estiman la cantidad de material erosionado (Bufalo y Nahon 1972). Dado que los procesos de erosión por cárcavas son fenómenos que ocurren y se relacionan con otras características del territorio, las tecnologías de manejo de información espacial, y los sistemas de información geográfica (SIG) juegan un papel importante en el análisis de los procesos implicados. (Martínez, Casanova, y Porta., 1999)

El presente trabajo, se basó en la aplicación de técnicas de: teledetección (fotointerpretación: análisis multitemporal de fotografías aéreas) y sistema de información geográfica (SIG), para la adquisición, análisis y representación de la información espacial relacionada con la investigación, siendo la fotografía aérea, la principal fuente de información dada su elevada resolución espacial y las posibilidades de visión estereoscópica.

Schumann (1979), examinó el papel de umbrales intrínsecos que estaban relacionados con el proceso interno de la cárcava, a partir de estudios en Colorado, Nuevo México y Arizona, estableció una función discriminante entre condiciones estables e inestables en función del tamaño del área de la cuenca de captación y la pendiente del cauce. Cuando para un área de captación determinada, la pendiente del cauce excede un valor crítico, se produce una incisión que origina un cauce caracterizado por uno o más escarpes de cabecera. La abrasión posterior motiva que la cárcava se torne muy activa: el cauce se ensancha, profundiza y avanza la cabecera.

Con el tiempo, la pendiente del cauce se reduce promoviendo una fase de consolidación como cárcava estable, el cauce se llena, las paredes laterales y la cabecera se aplanan y la vegetación reaparece. La deposición aumenta de nuevo, la pendiente y provoca una nueva fase de crecimiento de la cárcava. De este modo, las cárcavas pasan por sucesivos ciclos de erosión y deposición. No es raro que la cabecera de una cárcava sea extremadamente activa, mientras que una sección más baja esta estabilizada, o cárcavas que presenten una secuencia alternante de secciones estables e inestables.

La extensión de las cárcavas como manifestación paisajística de procesos severos de erosión hídrica está en estrecha relación con las condiciones que favorecen el desarrollo de la escorrentía superficial y sub-superficial. Es por ello que, las mutaciones sistemáticas en los usos de los suelos en los paisajes agropecuarios, producen una variabilidad histórica en el sistema suelo.

El conocimiento de los ritmos y orientación de esta variabilidad constituye un insumo imprescindible para orientar el trabajo de gestión sustentable. Por lo que la cartografía temática acompañada de leyendas respectivas permitirá comprender la evolución geográfica-temporal de las variables ambientales que actúan en los procesos de extensión del patrón de cárcavas: hipsometría y pendiente, caracterización geológica, tipos de suelos, patrón de drenaje superficial jerarquizado, cobertura vegetal, y usos del suelo.

Muchas de las cárcavas y zanjonés que se generaron en el pasado, están sin variación y además, muchas de ellas siguen activas. Las prácticas de laboreo continuo de suelos no conservacionistas (laboreo convencional), han determinado la colmatación de los cursos de agua con los horizontes superiores del suelo, reduciendo la capacidad de almacenamiento de agua, además de tapar los manantiales naturales

IV.- INTERROGANTES - OBJETIVOS - HIPÓTESIS

4.1.- Interrogantes

Este trabajo tiene cómo problema central, indagar sobre los factores: físicos y morfométricos, que inciden en el proceso de erosión en cárcavas, así como contribuir en el proceso de generación de conocimiento sobre los procesos interactuantes para el desarrollo de tales formas.

Las interrogantes que orientan la investigación son:

- 1) **En cuanto al ORIGEN y EVOLUCION de las cárcavas del área de estudio:** ¿Es posible aplicar un modelo matemático sencillo que permita medir el proceso geomorfológico de incremento de la extensión en planta de las cárcavas del área de estudio? ¿Es posible identificar y jerarquizar variables socio-ambientales que inciden en la génesis y evolución de las cárcavas?
- 2) **En cuanto a los FACTORES que actúan en el área de estudio:** ¿Cuáles son las variables representativas de los factores morfométricos físicos que se relacionan directamente con la extensión en planta de las mismas? ¿Cómo incide la resistencia a la penetración del suelo de la microcuenca en la erosión en cárcavas?
- 3) **En cuanto a su DINAMICA:** ¿Es posible arribar a un marco explicativo que permita explicar el proceso erosivo en el área de estudio? ¿A qué tipología de cárcavas se puede arribar según su dinámica para su clasificación con fines explicativos?

4.2.- Objetivos

4.2.1.- Objetivo general:

Cuantificar e interpretar, los factores, procesos y dinámicas de dos series de cárcavas en el NE de Canelones, Municipio de San Jacinto, Uruguay.

4.2.2.- Objetivos específicos:

- 4.2.2.1.- Correlacionar la distancia al interfluvio desde la línea de avance de las cabeceras y la resistencia a la penetración, como variable representativa de los factores físicos del suelo de la microcuenca y con el incremento en el área de las cárcavas.
- 4.2.2.2.- Identificar los factores y las correspondientes variables representativas de los mismos que permitan explicar el incremento en el área de las cárcavas.
- 4.2.2.3.- Tipificar las cárcavas según la diferencia de crecimiento en el área de la superficie erosionada, el estado de situación y explicar la dinámica de cada categoría en función de la correlación con las variables morfométricas y físicas.
- 4.2.2.4.- Aplicar un modelo matemático sencillo, con base empírica, interpretativo de la tasa de crecimiento de la superficie de las cárcavas para el área de estudio.

4.3.- Hipótesis

La hipótesis que se sostuvo es:

El incremento del área y las modificaciones geométricas de las cárcavas responderían a la interacción entre diferentes factores (variables físicas y morfométricas) que se manifiestan en forma jerárquica y que pautan la extensión horizontal de cada cárcava.

V. MATERIALES Y MÉTODOS

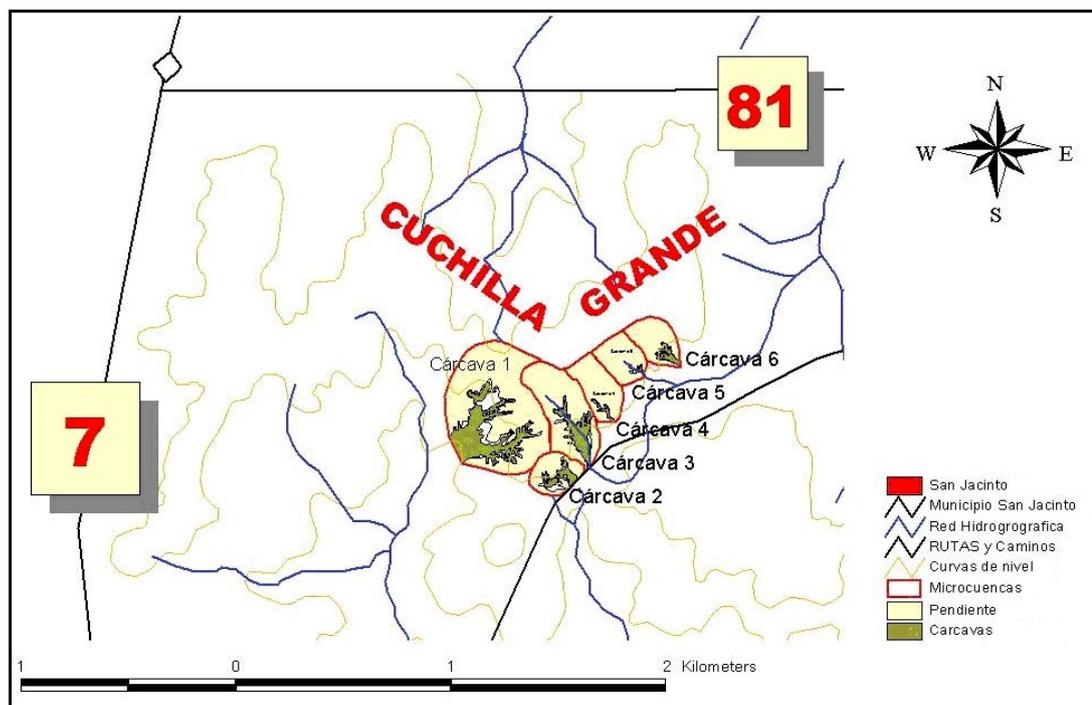
5.1.- Descripción del Área de Estudio

El estudio se desarrolló en el Municipio de San Jacinto, Sección 14 del Departamento de Canelones, Uruguay, donde se identificaron 10 cárcavas inscriptas cada una en una microcuenca en dos zonas diferentes:

a) **Zona Norte**, a unos 10 km de la ciudad de San Jacinto por la Ruta Nacional N° 7 al Norte, en el camino que va de desde Puntas de Cochengo a Puntas del Arenal en la Ruta Nacional N° 81, sobre la Cuchilla Grande a unos 80 msnm, se identificó una serie de 6 cárcavas las cuales las podemos dividir según la subcuenca a la cual pertenecen:

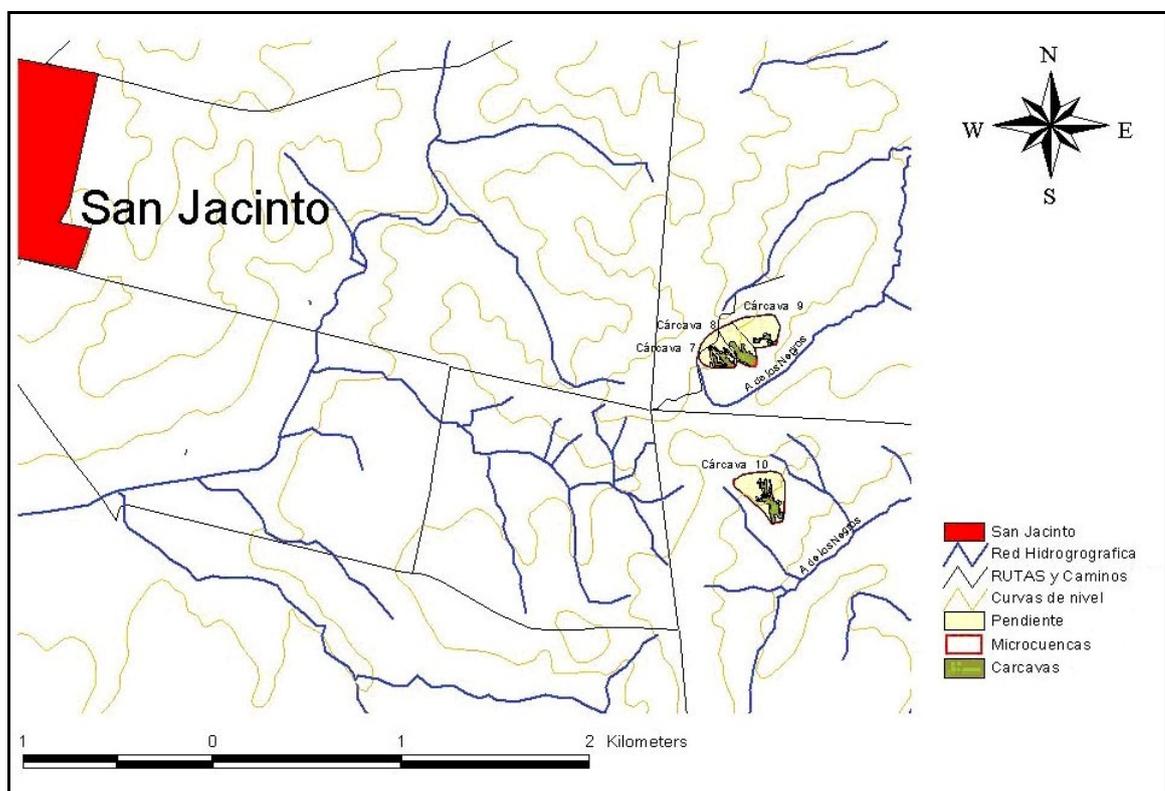
Cárcavas N° 1, N° 2 y N° 3, se encuentran en las nacientes del Arroyo de la Piedra Sola, (afluente el Arroyo Solís Chico) pertenecen a la Microcuenca del Arroyo Solís Chico, y las cárcavas identificadas con los números: **N° 4, N° 5 y N° 6** pertenecientes a la sub cuenca del Arroyo Arenal Grande.

Figura 5.- Área de estudio: Zona Norte



b) **Zona Sur**, entre las ciudades de San Jacinto y Tapia, a 4 km de San Jacinto al Este en el paraje Puntas de Pedrera por el camino vecinal hacia Tapia encontramos una serie de 3 cárcavas al Norte del camino, las cuales identificamos con los números: N° 7, N° 8 y N° 9 pertenecientes a Subcuenca del Arroyo de los Negros, afluente del Arroyo La Pedrera y a la misma altura, al Sur, la cárcava identificada con el N° 10 del otro lado del camino vecinal y la subCuenca del Arroyo de los Padres u de los Negros.

Figura 6.- Área de estudio: Zona Sur



El Noreste del departamento de Canelones, constituye uno de los asentamientos agrícolas más antiguos del Uruguay; gran parte de la inmigración española e italiana que llega al país en la segunda mitad del siglo XIX, colonizaron estas tierras y se dedicaron principalmente al cultivo de cereales para el abastecimiento de la ciudad de Montevideo. Los primeros pobladores se dedicaron a la producción de la granja, de la chacra y al cultivo de la vid. Estos inmigrantes a su vez más adelante promovieron la venida a la zona de familiares y amigos que habían quedado en la Europa que comenzaba a presentir el comienzo de la primera guerra mundial. (VIGLIZZO et al., IICA, 1995)

En el siglo XX, el crecimiento demográfico y urbano de Montevideo, el encarecimiento del precio de la tierra y el adelanto en los medios de transporte, hace que los cultivos de cereales pasen a realizarse en zonas más alejadas de la capital y los agricultores de Canelones pasan a dedicarse a cultivos intensivos de mayor precio en el mercado. En la década del 30, América del Sur estaba inmersa en una crisis económica, por lo que, la región se orientó hacia un “crecimiento hacia adentro”, liderado por la industrialización por sustitución de importaciones. El estado fue un actor principal de este proceso; su papel económico y social se expandió rápidamente, impulsó la producción agrícola para autoabastecimiento, ampliándose así las áreas de cultivo y relocalizando sus distintos rubros.

Esta región tiene su fecha clave en 1939, cuando la empresa Rausa (Remolacheras y Azucareras del Uruguay Sociedad Anónima) instala su complejo industrial. La remolacha azucarera generó un modo de vida en sí mismo "La gente tenía asegurada la financiación del cultivo y Rausa era el agente de retención que compraba todo lo que la familia producía y asesoraba durante todo el cultivo". Esta conjunción llevó a un uso intensivo y exclusivo de las tierras destinadas a tal producción por parte de las familias de la zona. El pico de prosperidad se dio a fines de la década de los 50, donde Rausa empleó a unas 5000 personas, más otras 1000 que se agregaban en las épocas de zafra y produjo grandes beneficios para la zona. Según el Censo Agropecuario de 1970, en los predios menores de 20 hectáreas, que representan el 65% del total de establecimientos de la zona, ocupando el 23% del área, predominaban rubros agrícolas como remolacha azucarera, maíz, papa, boniato, tomate, cebolla y zapallo. A medida que los predios aumentan de tamaño, pasaban a predominar las tierras dedicadas a la ganadería. En predios mayores a 20 hectáreas que representaban el 35% de los establecimientos y ocupan el 77% del área, la agricultura ocupa menos de la mitad del terreno siendo predominantes, el campo natural y el uso ganadero. Desde 1944, la presencia del ingenio azucarero en Montes, trajo como consecuencia que la remolacha azucarera se transformara por años en el rubro principal de muchos productores de la zona, involucrando a unos 2900 productores del Noreste de Canelones. Otro polo de demanda lo constituyó el Mercado Modelo y las agroindustrias de Montevideo que concentran la producción hortifrutícola del país. Por razones de perecibilidad de productos y costos de fletes, estas producciones se concentraron a lo largo de las Rutas Nacionales N° 6, N° 7 y N° 8 (denominada “el Santoral”: San Ramón, San Bautista, San Antonio y San Jacinto).

Entre 1956 y 1970 la superficie dedicada a la agricultura descendió del 37% al 26% del total, en tanto el área dedicada al pastoreo ascendió en el mismo período del 47% al 62%, y la producción de hortalizas, que ocupaba tan solo 3% del área se incrementó pasando del 3% al 4%. Se produjo además un cambio en los rubros de producción en la zona, como consecuencia de polos de demanda existentes que las condicionan.

Desde fines de la década del 70 comenzó un proceso de éxodo rural, el cuál se agravó a partir de la entrada en vigencia del Mercosur, ya que el mercado horti-frutícola se vio inundado de productos importados. Con el advenimiento de la dictadura cívico militar (1973), el estado deja de intervenir en esta actividad no fijando más los precios de las materias primas provocando que los productores quedasen a expensas de las decisiones de la empresa, sufriendo por tanto una importante caída de los precios y el consiguiente deterioro de las condiciones de vida de las familias que contaban con éste rubro como única fuente de ingresos. (Echeverriborda y Garet, 2006). Este proceso llevó a Rausa a cerrar en 1988 y no solo dejó un gran empobrecimiento económico en la zona, ya que la plantación de remolacha azucarera era casi exclusivamente el único cultivo en muchos de los predios familiares, sino que además dejó los suelos con un importante grado de erosión generando grandes inconvenientes a la hora de planificar.

En la década de los 80, el 80 % del tomate que consumía Uruguay provenía de esta zona de Canelones, contó Ponce de León (Entrevista Diario La Republica, 2009). “Al cerrar Rausa, la situación fue catastrófica para la zona, desaparecieron parajes poblados de familias que dependían del cultivo de remolacha; a lo que se le sumó que se empezó a importar concentrado de tomate para la realización de salsa, se llegó a importar el 95% del tomate industria. Con el cierre de las agroindustrias se cerraron todas las sociedades fomento de la zona; la que no estaba cerrada tenía una directiva figurada sin actividad, todo estaba cerrado, sólo quedaba San Antonio”, aseguró Ponce de León.

Desde la década del 90 han abandonado las tierras más del 25% de los productores, esto a pesar de la gran capacidad de adaptación y sobrevivencia en condiciones extremas que lo caracterizan. Sin embargo cabe agregar que es una característica de los productores del NE de Canelones, una tendencia a la diversificación productiva y una gran sensibilidad para el cambio de rubros año a año en función de la eventual relación oferta-demanda.

Canelones tenía en el 2004 una población de 485.240 habitantes (INE, 2004), el segundo lugar después de Montevideo, representando el 15% de la población total de Uruguay y es donde se encuentran las áreas rurales más pobladas del país, 20% de la población rural y 16% trabajadores zafrales (DIEA 2000, IICA, 2006). La densidad de población dentro del departamento es diferencial en función de la distancia con la capital variando de 20 a 500 hab/km² (IICA, 2006). El grado de urbanización pasó de 86,8% en 1996 a 88,6% en el 2004, sin embargo, el promedio de habitantes del área rural es de 11,4%, superior al promedio nacional de 8%.(INE, 2004). El total de explotaciones agropecuarias es de 10.706 (19% del total del país) y ocupan el 6% de la superficie agrícola total. (DIEA, 2000, IICA 2006).

El NEC se caracteriza por el predominio casi exclusivo de predios familiares pequeños (menores a 50 ha) con actividad de horticultura acompañada de cría de ganado el cual, en la mayoría de los casos, se utiliza como un capital de reserva al cual se puede recurrir como fuente de ingresos en períodos de crisis económica, según el ingreso principal, el mayor número de explotaciones se dedica a la ganadería, seguida por la horticultura. Una tercera parte, explota al menos dos rubros, siendo ganadería y horticultura la combinación más frecuente. (Censo Agropecuario 2000)

Tabla IV.- Tendencias en el uso del suelo en Canelones según evolución y destino de la producción

RUBROS		1825	1900	1934	1950	1970	1984	1991	2000	2004	2010
Cerdos											
Vacunos											
Ovinos											
Cereales											
Cereales forajeros											
Remolacha azucarera			RAUSA (1902)								
Lechería			CONAPROLE (1936)								
Vitivinicultura											
Fruticultura h. caduca											
Citricultura					Plan Citricola						
Horticultura											
Aves											
Miel											
Forestación											
	Colonia	Independencia	Batlle	Terra			Dictadura	Democracia	Mercosur		

 Consumo interno
 EXPORTACION

Situación de los Suelos

El hecho de que en la zona se haya practicado por unos 100 años monocultivos cerealeros (rotaciones maíz-trigo), y por más de 40 años producción de remolacha sin criterios conservacionistas en el manejo de los suelos, provocó que la erosión sea el factor más limitante del recurso suelo de la zona. La baja fertilidad y la arada tradicional en el sentido de la pendiente, determinaron el deterioro de las propiedades físicas del suelo. A su vez la repetición de cultivos carpidos con ciclo invernal y la falta de cobertura, acentuaron el efecto erosivo de la lluvia.

Estudios realizados por la [DSA-MGAP \(1985\)](#) determinaron que el 36% de los suelos del NE de Canelones sufren condiciones de erosión severas a muy severas en los cuales es imposible desarrollar la agricultura; pero además un 30 % más sufre condiciones moderadas de erosión. Como consecuencia el productor cultiva solo aquellas partes de su chacra con menor erosión y el resto desarrolla ganadería destinada a proporcionarle bueyes, carne y leche para el consumo familiar. Según estudios de la [IMC \(2006\)](#) las zonas con mayores problemas de erosión muestran los mayores índices de emigración rural. Algunas zonas, donde se realizaron los asentamientos agrícolas más antiguos del país y los procesos erosivos son más graves, muchos productores han abandonado los predios. Esta situación de abandono en cierta medida frenó el proceso erosivo y el proceso de evolución de las cárcavas se estacionó. Con respecto al uso del suelo, se destaca el campo natural, que cubre casi 60% de la superficie total, las praderas artificiales con 16% y la forestación con 8%. También es importante la superficie hortícola total, con casi 3000 ha.

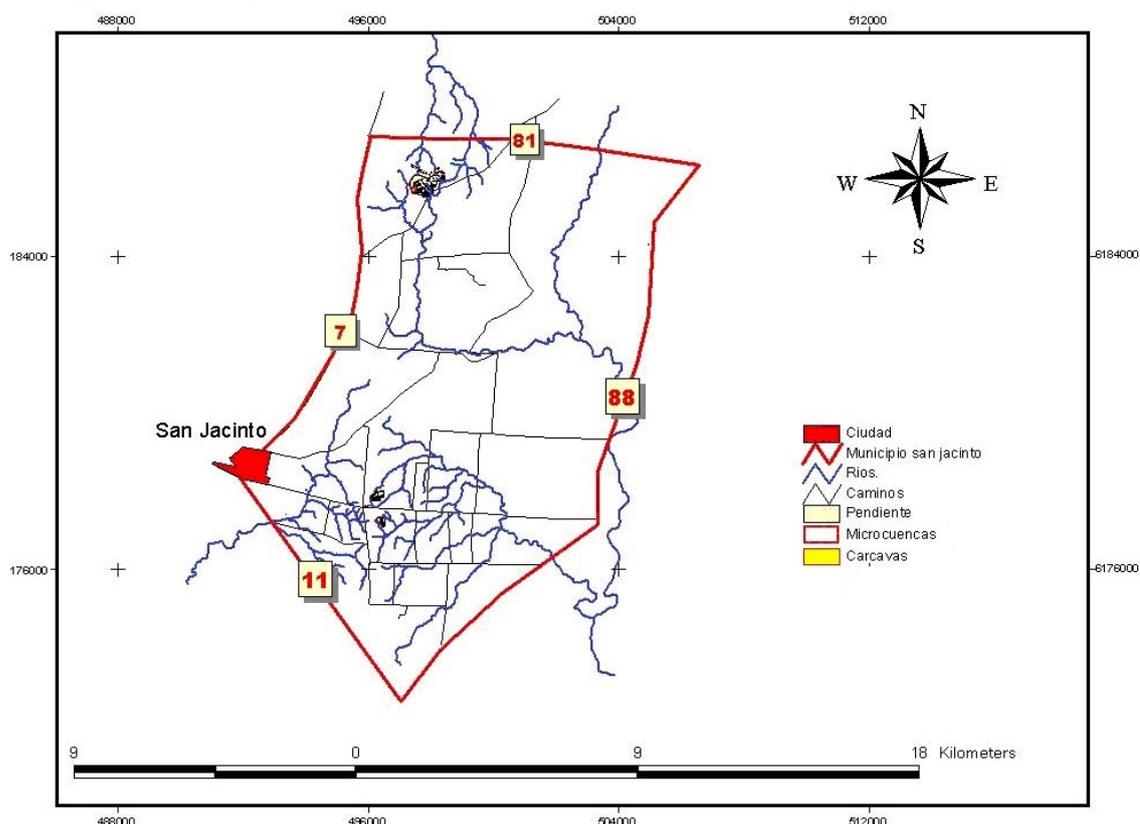
Origen de la ruptura del equilibrio metaestable

La misma se origina a partir de diferentes factores naturales y antrópicos. Dentro de las intervenciones antrópicas, la bibliografía referida al tema destaca: la falta de manejo conservacionista del recurso suelo y particularmente las malas prácticas agrícolas. Las características de las producciones realizadas en la zona, ha determinado el fuerte impacto sobre el recurso suelo, generando un proceso acentuado de erosión y constante pérdida de suelos.

Caracterización geográfica

El Municipio de San Jacinto en el NE de Canelones, se extiende entre los $-38^{\circ} 25'$ y los $-38^{\circ} 50'$ de latitud y entre los $61^{\circ} 90'$ y los $62^{\circ} 10'$ de longitud (Figura 7).

Figura 7.- Emplazamiento del área de estudio: Municipio de San Jacinto en el NE de Canelones



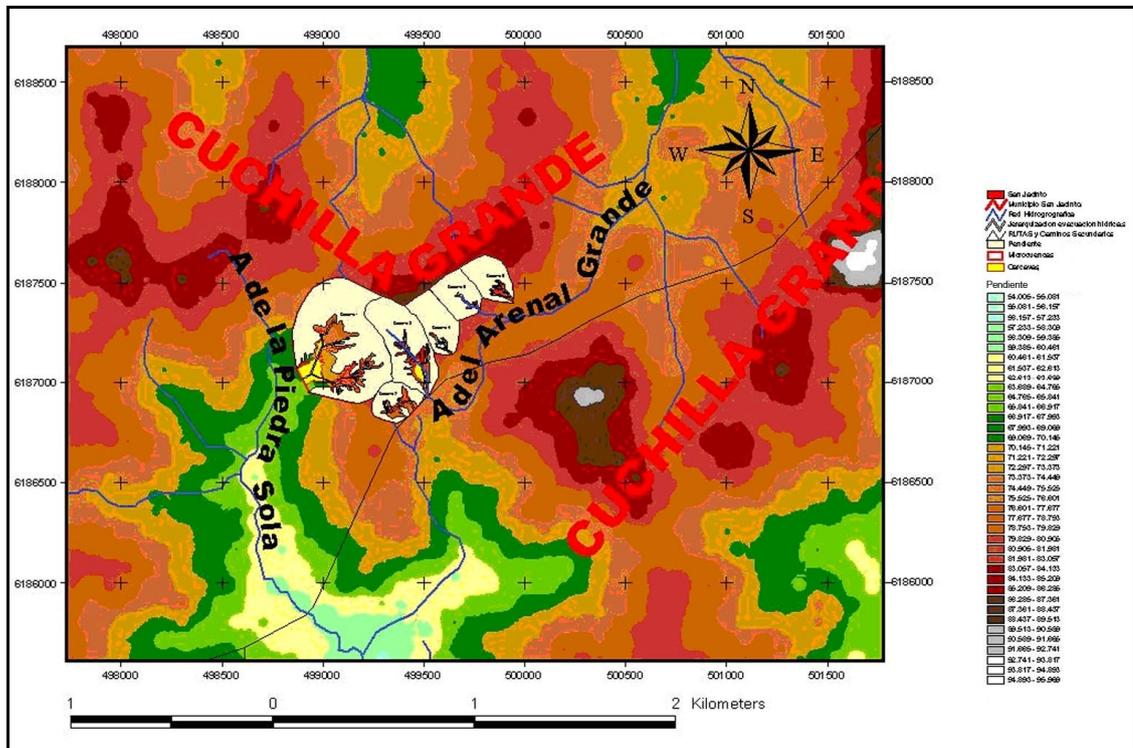
El Municipio de San Jacinto, tiene su centro en la ciudad de San Jacinto, distante 53 km. al Norte de Montevideo, ubicada sobre el cruce de rutas 7 y 11. Los límites son: **Al Norte:** Ruta Nacional N° 81, desde el camino que une el Paso Marrero en el Arroyo del Tala y Paso del Puente sobre el arroyo Cochengo hasta el Arroyo Solís Chico. **Al Este:** Arroyo Solís Chico, aguas abajo, desde la Ruta Nacional N° 81 hasta el Paso de Las Yeguas. **Al Sur:** Camino que une Arroyo Solís Chico con Arroyo Pando, desde el Paso de Las Yeguas hasta el Arroyo Pando pasando por Ruta Nacional N° 11 y Ruta Nacional N° 7. **Al Oeste:** Arroyo Pando, aguas arriba, desde el camino que lo une con el Arroyo Solís Chico hasta el Arroyo Cochengo, continuando por éste, aguas arriba, hasta el camino en Paso del Puente y por este camino hacia el Norte hasta Ruta Nacional N° 81.

La ubicación geográfica, en la región sur del Uruguay sobre el Río de la Plata, corresponde a un paisaje ondulado, en concordancia al sistema de paisaje más regionalizado de Canelones.

La fisiografía del paisaje se caracteriza por un sistema de lomadas, comúnmente denominadas cuchillas, que en general son uni y multidireccionadas. Estas lomadas generan cuencas y subcuencas de diferente orden. En el área de estudio se encuentra la Cuchilla Grande, que ingresa al departamento de Canelones, desde el NE y continúa con dirección Oeste hasta la localidad de San Bautista, allí prosigue, con cambio de rumbo, hacia el Sur-SO. El conjunto morfohidrográfico presenta una dirección Nor.-NE a Sur-SE con una pendiente generalizada, que va desde la Cuchilla Grande, hasta el Río de la Plata. (Spoturno, J y Oyhantcabal, P. 2004).

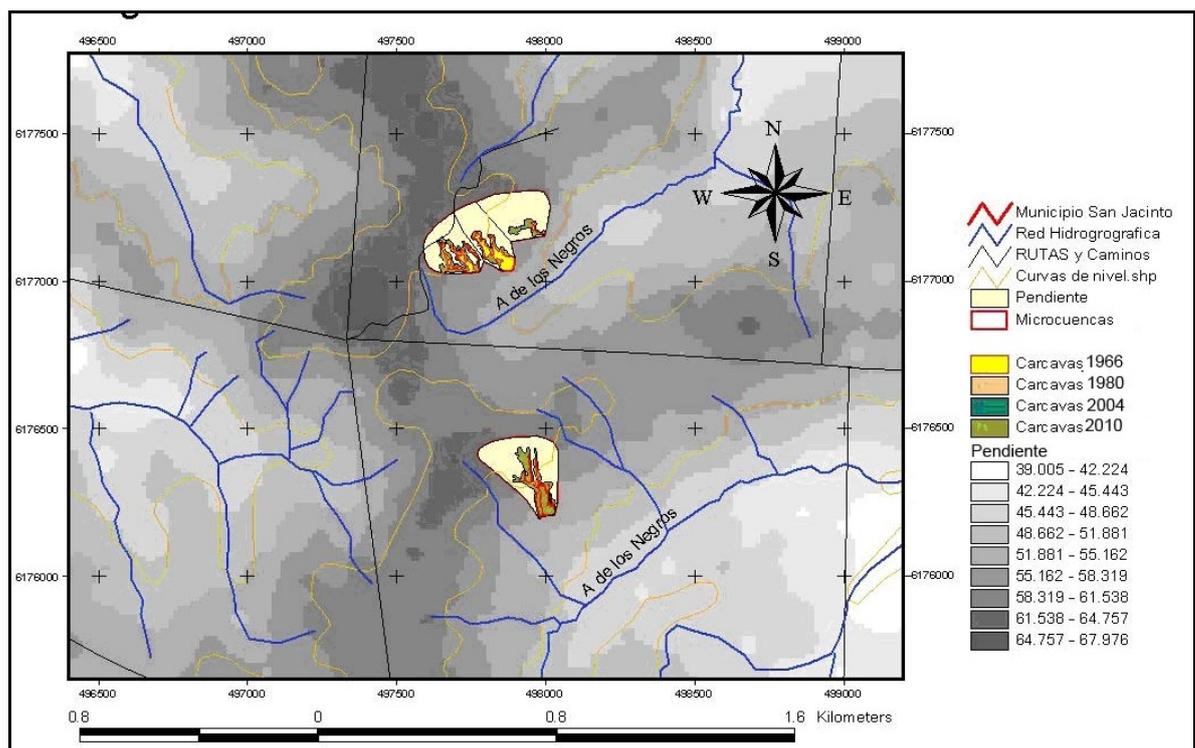
Con relación a la situación topográfica, de acuerdo a las cartas topográficas del Servicio Geográfico Militar, el promedio altimétrico se encuentra entre los 40 y 50 metros, siendo la altura máxima, 135 metros en el Cerro de Mosquitos, ubicado en el este del departamento de Canelones y 0 metro, correspondiente al nivel de la costa del Río de la Plata.

Figura 8.- Caracterización física de Zona Norte (Cárcavas N°1, N° 2, N° 3, N° 4, N° 5, y N° 6)



Desde el punto de vista geomorfológico y siguiendo la regionalización de Canelones, realizada por [Spoturno, et al \(2004\)](#), el área de estudio se encuentra en la Región III, Terrenos Ondulados. Dentro del paisaje se pueden distinguir dos patrones fisiográficos: uno caracterizado por terrenos ondulados y fuertemente ondulados y otro representado por lomadas suaves. El área de estudio (Figuras 8 y 9), corresponde al sistema de paisaje más generalizado de Canelones, se trata de lomadas que van desde suave a moderadamente onduladas, alargadas, con interfluvios extensos, planos a ligeramente convexos, laderas con pendientes planas muy suaves de tipo simétricas y asimétricas, valles muy extensos de tipo plano. Las altitudes máximas para esta región comprende las cotas 40 y 50 metros y sobre la Cuchilla Grande con altitudes entre los 70 y 80 metros.

Figura 9.- Caracterización física de Zona Sur (Cárcavas N° 7, N° 8, N° 9, y N° 10)



Ambas zonas de estudio (Norte y Sur), se encuentran sobre Formación Libertad y se relacionan con grupos de suelos CONEAT 10.8 a. A este grupo corresponden la mayoría de las tierras onduladas suaves del Departamento de Canelones, situándose en los alrededores de centros poblados tales como San Jacinto, Tala, Tapia, San Bautista, etc.

La Formación Libertad fue definida por [Goso, H. \(1965\)](#), que la separó de un conjunto de sedimentos cuaternarios, que [Caorsi y Goni \(1958\)](#) denominaban Loess de Arazatí, el término que había sustituido la denominación original del Pampeano. A ésta Formación, desde el punto de vista cronoestratigráfico, [Ubilla y Perea \(1999\)](#) le asignan una edad Pleistocena en sentido amplio, esta ampliamente distribuida en Canelones, ocupa por lo general las zonas de laderas medias e interfluvios, tapizando en discordancia y parcialmente las unidades geológicas más antiguas. Genera relieves suavemente ondulados de lomadas plano convexas, valles amplios planos, laderas planas con pendientes suaves y muy suaves no mayor a 3% e interfluvios alargados, plano convexos. La densidad de afloramientos es baja a muy baja, la mayor parte se restringen a la ocurrencia de cárcavas, en zonas de laderas que no sobrepasan el 1,5 metros de profundidad.

La energía del relieve es baja a media, presenta una edafización generalizada y afloramientos cuando la energía se acentúa, en cuyo caso son frecuentes las cárcavas. Estas geoformas se ven friables en sus distintas litologías. Litológicamente está integrada por materiales sedimentarios de granulometría fina: arcillitas, limo arcillitas, limos loésicos. La fracción arena ocurre con frecuencia como clastos de cuarzo y feldespato, dispersos en la matriz fina adquiriendo la roca carácter fangolítico. Las litologías limosas y arcillosas ocurren hacia la parte media y superior, mientras las fangolíticas se disponen hacia la porción basal, cercano al contacto con las formaciones arenosas del cretácico y terciario y de las rocas cristalinas del proterozoico. El carbonato de calcio aparece de manera frecuente, disperso como cemento o en agrupamientos en diversas formas: concrecional, muñecas y/o pequeños bancos irregulares en disposición subhorizontal. Es la unidad que desarrolla la mayor parte de los suelos de la región y es la que aparece, en forma inmediata y con mayor frecuencia, por debajo del suelo. ([Spoturno et al 2004](#))

Según la Carta de Reconocimiento de Suelos del Departamento de Canelones ([MGAP](#)) a escala 1:100.000 las Series Dominantes que constituyen las principales unidades de suelos conforman un mosaico que guarda cierta relación con su posición topográfica en el paisaje. A partir de la

superposición de coberturas del SIG proporcionadas por el MGAP: Geomorfológica, Geológica, Suelos Dominantes y zonas de interés; en el paisaje el Argisol Dístrico se localiza sobre las colinas mientras que el Argisol Subéutrico se localiza en las lomadas fuertes,

Los **Suelos saturados lixiviados** representados por los Argisoles Subéutricos y Dístricos y por Planosoles Dístricos y Subéutricos sufren procesos de lixiviación de las arcillas presentando un horizonte H₂B, bien desarrollado y procesos de hidromorfismo. En los Argisoles se observa una napa colgada de corta duración que hace que el horizonte arcilloso sea compacto. Estas características se acentúan en los Planosoles cuya napa colgada es de mayor duración, con mayor proceso de lixiviación produciendo un H₂B poco permeable, asociado a topografías planas o suaves.

Los **Suelos Melánicos** expresados por los Brunosoles Éutricos (Fr), Brunosoles Subéutricos (LAc) y Brunosoles Dístricos (ArFr) se conocen como praderas negras o pardas por su coloración. Presentan un horizonte melánico (rico en materia orgánica), con valores más elevados en el nivel superior, para luego ir disminuyendo a medida que se profundizan. Por sus características de textura y estructura son moderadamente drenados. Cuando ocupan las zonas bajas del paisaje pueden perder parte de su permeabilidad, haciéndose más oscuros y compactos. La dominancia en el paisaje lo constituyen los Brunosoles Éutricos sobre las lomadas suaves, mientras que los Brunosoles Subéutricos lo hacen en las lomadas fuertes y los Brunosoles Dístricos en los valles fuertes rocosos. Según la clasificación de suelos del Uruguay (MGAP), los suelos del área de estudio mayoritariamente pertenecen al grupo CONEAT 10.8 a, que ocurren en laderas convexas, con sus respectivas concavidades, donde naturalmente el riesgo de erosión es alto y donde se han realizado cultivos anuales (entre ellos cultivos estivales carpidos), en forma continua y sin ninguna medida de conservación de suelos. La productividad para el grupo CONEAT 10.8 a es media a baja; expresada como Índice CONEAT (MGAP), lo sitúa en 105, corresponden a suelos en su mayoría con fertilidad alta, moderado drenaje y muy erosionados.

De acuerdo a la Carta de Erosión Antrópica (DSA-MGAP), y al mapa de Intensidad del Proceso Erosivo, escala 1:500.000 (Renare-MGAP), el área de estudio se encuentra comprendida en la zona con grado de erosión severa, y se aprecia que la mayor incidencia se da sobre lomadas fuertes y lomadas fuertes alcalinas. Éstas geoformas, están asociadas a suelos livianos, Brunosoles Subéutricos (ArFr), que reciben las aguas de lluvia y de escurrimiento con alto poder erosivo, encontrándose abajo en la ladera y con pendiente fuerte, zona propicia para la formación de cárcavas al removerse parte de perfil del suelo y generar un escalón de corte. (Blanco, 2003)

El clima es de tipo templado siendo la temperatura media anual de 17,2 °C y la precipitación media anual de 1189,9 l/m² la zona en estudio se encuentra en el entorno de la Isoyeta 1.000mm (DNM). En términos generales, el clima es subtropical húmedo con veranos cálidos, humedad relativa alta, precipitación y evaporación intensas, con variaciones estacionales de temperatura bien acusadas y riesgo de sequías prolongadas. (Corsi W. 1978). De acuerdo a Nagy et al (2002) existiría una tendencia incremental de las precipitaciones medias anuales a escala nacional.

El área de estudio se encuentra fuertemente antrozizada, (IICA 2007). “El NE de Canelones es una zona altamente carenciada, con falta de fuentes de trabajo y baja densidad demográfica. El sistema productivo es hortícola-ganadero, donde gran parte de la horticultura es para subsistencia. Existen escasos recursos de explotación: pocos y acotados rubros y actividades como opción para los productores y pobladores. La productividad es media a baja, existe un alto grado de erosión en los suelos y hay escasos recursos de explotación. Además existe falta de fuentes de trabajo, aislamiento y distancia a los mercados, y experiencias negativas. La capacidad de inversión, la maquinaria y servicios con que cuenta la zona también es baja. Desde 1950 ha habido una aplicación de políticas agropecuarias que han tenido poco resultados y que se evidencian en la alta emigración que sufrió esta zona”. Otras características destacadas son: la historia común de los remolacheros; valores comunes, el paisaje (habitat); servicios escasos y pocas posibilidades de formación. Existe potencial agrícola, ganadero y forestal y se evidencia un proceso de concentración de la tierra.

5.2.- Materiales

- Cartas topográficas a escala 1:50.000, Hojas H-28, J-27A, J-27D y J-28A.
- Cartografía de base en formato digital obtenida en el Servicio Geográfico Militar (SGM).
- Carta Geológica del Departamento de Canelones: Año 2004 (escala 1:100.000)
- Fotografías áreas: Año 1966 y 1980 (escala 1:20:000), SGM.
- Fotografías aéreas: Año 2004 (1:20:000), Fuerza Aérea Uruguaya (FAU).

Tabla V.- Fotografías aéreas ingresadas al SIG

Año	Zona	Fuente	Nº Foto	Escala
1966	Sur	S.G.M.	122 089 (b\ñ)	1:20.000
1980		S.G.M.	50 0726 (b\ñ)	1:20.000
2004		F.A.U.	11984 - 4543 (color)	1:20.000
1966	Norte	S.G.M.	122 084 (b\ñ)	1:20.000
1966		S.G.M.	122 127 (b\ñ)	1:20.000
1980		S.G.M.	08 5503 (b\ñ)	1:20.000
1980		S.G.M.	08 5501 (b\ñ)	1:20.000
2004		F.A.U.	11984 - 4543 (color)	1:20.000

- Cartografía temática: Grupos de Suelos según Índice CONEAT (1979), a escala 1:20.000 proporcionada en formato digital por el MGAP.
- Cartografía temática: Información demográfica en formato digital y a escala de zonas censales del departamento de Canelones según Censo General de Población (INE).
- Cartografía temática: Uso del suelo e historia de usos del suelo en el área a partir de Censos Agropecuarios y Anuarios Estadísticos aportados por DIEA- MGAP.
- Scanner, utilizado para digitalizar las fotografías aéreas utilizadas.
- Par de estereoscopios de espejo/bolsillo.
- Software: Arc-View gis 3.2, extensiones Image Analysis y Polygeom.
- GPS, utilizado para determinar la posición en terreno de los puntos seleccionados para georeferenciar la información recabada y verificación de campo.
- Cámara digital, para el registro de imágenes relevantes en las salidas de campo.
- Taladro para toma de muestras de suelo.
- Penetrómetro para medir la resistencia del suelo.

5.3.- Metodología

La metodología empleada se orientó para alcanzar el análisis e interpretación de los cambios producidos en las aéreas afectadas por la erosión por cárcavas en el período 1966 a 2010. Para ello se utilizó cartografía de base en formato digital y fotografías aéreas: año 1966 y 1980 (escala 1:20:000) del Servicio Geográfico Militar y año 2004 (escala 1:20:000) del Servicio Fotográfico Fuerza Aérea y mediciones en campo con GPS para el estado actual 2010.

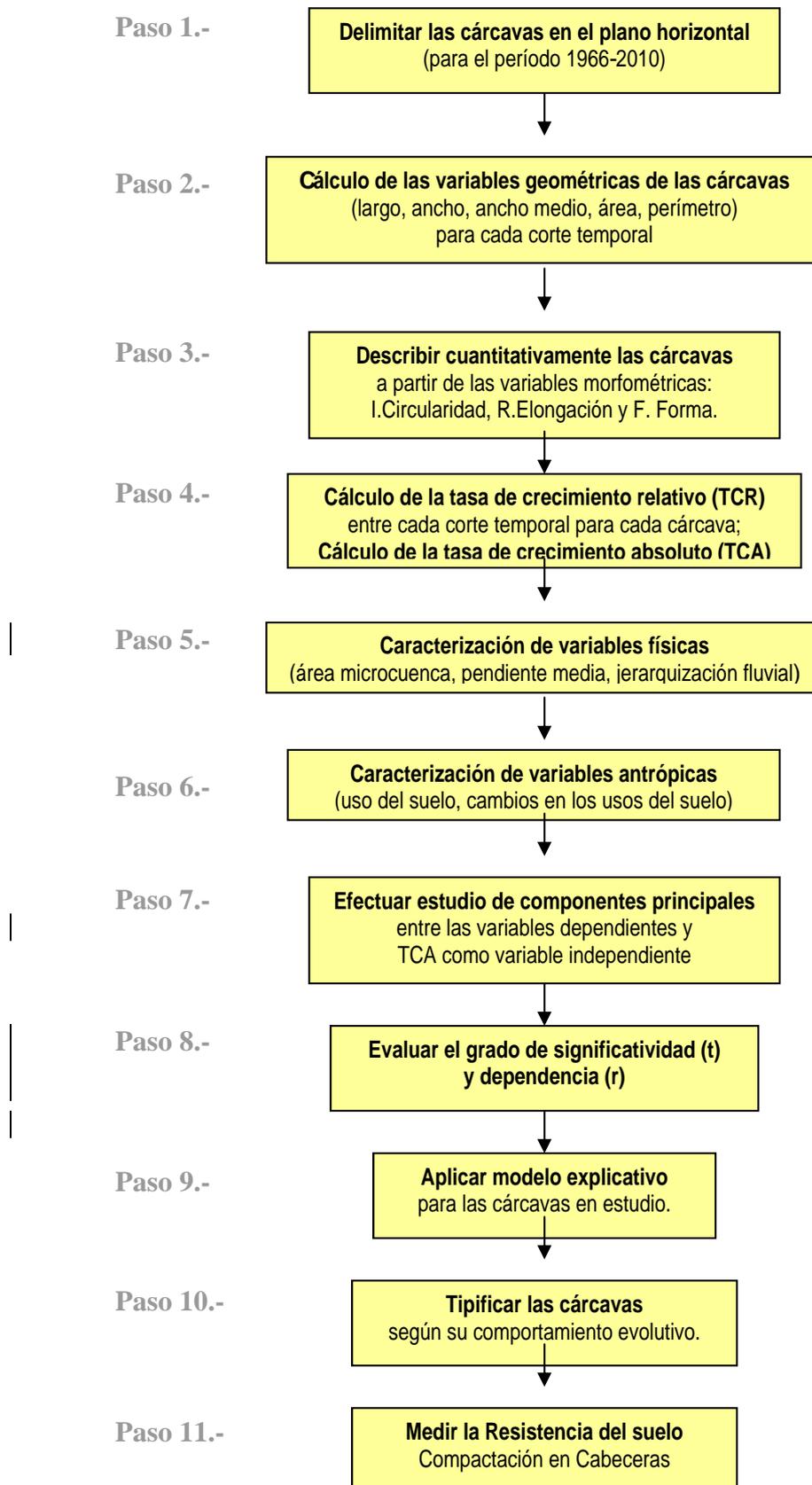
A partir del análisis de la cartografía temática: Cartas Topográficas a escala 1:50.000, Hojas H-28, J-27A, J-27D y J-28A; Grupos de Suelos según Índice CONEAT (1979), a escala 1:20.000 proporcionada en formato digital por el MGAP y Carta Geológica del Departamento de Canelones: Año 2004 (escala 1:100.000) proporcionada por DINAMIGE - MIE, se seleccionó en la región del NE del Departamento de Canelones, dos patrones de cárcavas en dos zonas de diagnóstico en los alrededores de San Jacinto, áreas de estudio bajo un mismo material geológico: Formación Libertad y pertenecientes a un mismo grupo CONEAT (10.8A), sobre lomadas, en la zona Norte entre cotas 70-90 m y en la zona Sur entre cotas 40-50 m.

En base a este análisis se determinó las variables geométricas que definen y caracterizan las cárcavas en planta: longitud, ancho, área, perímetro e índices de elongación y circularidad.

A partir de las mediciones de las variables geométricas se analizó cuantitativamente la expansión horizontal y las modificaciones producidas en las dimensiones y formas de las cárcavas en el tiempo. La medición secuenciada en el tiempo de la longitud permitió medir la extensión de las cárcavas a partir de sus cabeceras principales; y mediante el mismo procedimiento con el ancho, permitió la medición de la extensión de las cárcavas a partir de las cabeceras laterales. El cálculo de las variables: área y el perímetro indican las transformaciones ocurridas en la extensión en el plano horizontal de cada cárcava. Para evaluar los materiales afectados por la erosión, se realizó una caracterización ambiental de las microcuencas en las que se inscriben las cárcavas para cada cárcava en cada una de las áreas de estudio.

A continuación se presenta en forma gráfica la secuencia Metodológica que se empleó:

Figura 10.- Secuencia metodológica



Paso 1.- Delimitar las cárcavas en el plano horizontal, período 1966-2010.

- ◆ Ingreso al Sistema de Información Geográfico (SIG) y georeferenciación de las cartas geográficas digitales: H-28, J-27A, J-27D y J-28A.
- ◆ Ingreso al Sistema de Información Geográfico (SIG) de las fotografías aéreas (Tabla. II), mediante la utilización del escáner.
- ◆ Georeferenciación de las fotografías aéreas utilizando las coordenadas cartográficas tomando como fuente la cuadrícula plana del Servicio Geográfico Militar- Proyección Gauss (meridiano contacto 62^G). La cartografía se referenció geográficamente utilizando puntos de control con la extensión Image Analysis del programa Arc-View Gis.
- ◆ Confección de mosaico cartográfico tomando como fuente las cartas georeferenciadas utilizando la extensión Image Análisis del programa Arc-View 3.2.
- ◆ Diseño de las coberturas del SIG utilizando como herramienta el programa Arc-View 3.2.:
 - Extensión del área de estudio, definida por las microcuencas correspondientes a la red de drenaje que escurre por las cárcavas.
 - Trazado de hipsometría.
 - Diseño de red de drenaje primaria jerarquizada
 - Dibujo de la caminería e infraestructura vial.
 - Delimitación de usos del suelo y ecosistemas señalados en las cartas geográficas (praderas, forestación, agricultura)

Paso 2.- Cálculo de las variables geométricas de las cárcavas para cada corte temporal (largo, ancho, ancho medio, área, perímetro)

- ◆ Fotolectura y fotointerpretación del área de estudio a partir de las fotos aéreas en la secuencia temporal 1966-2010.
 - Delimitación de la extensión de las cárcavas.
 - Definir geográficamente las microcuencas que contienen las cárcavas: topografía que las limitan y diseño de la red de drenaje.
 - Separar unidades territoriales según distintos usos del suelo y cobertura vegetal.

- ◆ Salidas de campo, verificación y actualización de la información obtenida a través de fotolectura y fotointerpretación, y realización de mediciones de las variables geométricas de las cárcavas.
- ◆ Diseño de coberturas temáticas a partir de las fotografías aéreas ingresadas:

Posterior a la gerefereenciación, digitalización en pantalla las coberturas vectoriales (lineales, poligonales y de puntos) para cada uno de los cortes temporales establecidos:

 - Área estudio.
 - Microcuencas contenedoras de las cárcavas sobre cobertura de hipsometría.
 - Red hidrográfica: cursos de evacuación hídrica, y jerarquización según Strahler.
 - Variables geométricas de las cárcavas: área, perímetro, longitud y ancho
 - Red de caminería: rutas nacionales, carreteras y caminos secundarios.
 - Ecosistemas predominantes.
 - Predios: forma y extensión.

A partir de la cobertura Grupos de Suelos según Índice CONEAT, se confeccionaron las siguientes coberturas:

- Unidades CONEAT.
- Materiales geológicos.
- Grupos de suelos dominantes y asociados.
- Unidades geomorfológicas.
- Aptitudes agronómicas del suelo.
- Principales unidades de suelo.

Paso 3.- Descripción cuantitativa las cárcavas

Cálculo de las variables morfométricas: Factor Forma (F.F.), Índice de Circularidad (I.C.) y la Razón de Elongación (R.E.), para cada cárcava en cada corte temporal, a partir de las mediciones de las variables geométricas realizadas de las mismas.

$$\text{Factor Forma} = \frac{\text{Am (ancho medio de la cuenca)}}{\text{Lm (largo máximo de la misma)}}$$

Según Soczynska (1991), si: $es > 0,5$ = tendencia a la circularidad y a la concentrar energía.
 $es < 0,5$ = tendencia a la elongación y a disipar energía.

Razón de Circularidad (Rc) según Miller (1953):

$$Rc = \frac{A \text{ (área de la cuenca)}}{\text{Área de un círculo que tiene un P igual al P de la cuenca}}$$

Área de un círculo que tiene un P igual al P de la cuenca

P = perímetro

Los valores oscilan entre 0 - 1, y cuanto más tiende a la unidad la forma es más circular.

$$\text{Razón de Elongación (RE)} = \frac{D \text{ (diámetro de un círculo de área igual a la de la cuenca)}}{Lm \text{ (largo máximo de la misma)}}$$

Paso 4.- Cálculo de la tasa de erosión

Cálculo de la tasa de crecimiento relativa (TCR) entre cada corte temporal para cada cárcava; y la tasa de crecimiento absoluta (TCA) para el período 1966- 2010.

Medición del área de la superficie de las cárcavas para cada corte temporal efectuada desde el SIG. Con los resultados obtenidos, se calculó la TCA a partir de la diferencia entre el valor del área de la superficie de las cárcavas en el momento considerado inicial (1966) y el momento final (2010), de acuerdo con la siguiente formula (Pesce, 2009):

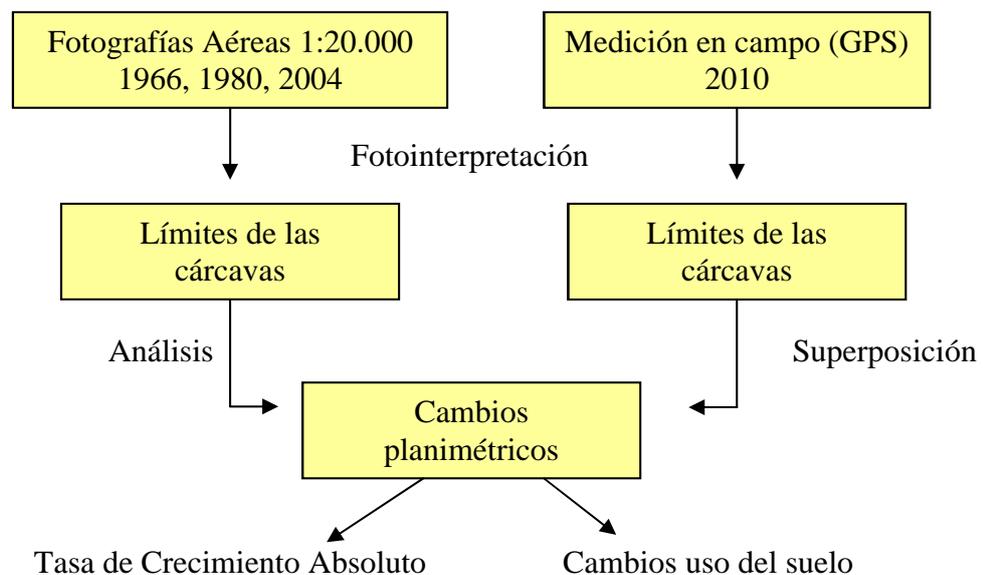
$$TCA = [AC (2010) - AC (1966)] / AC (1966)$$

Donde:

TCA = Tasa de Crecimiento Absoluta para el período 1966 - 2010.

AC = Área de la superficie de la cárcava medida en un corte temporal específico

Figura 11.- Proceso metodológico para análisis de cambios y cálculo de la TCA



Paso 5.- Caracterización de variables físicas

Medición del área de la superficie ocupada por cada microcuenca efectuada desde el SIG y cálculo del porcentaje ocupado por cada cárcava sobre el área total de cada microcuenca en cada corte temporal del período considerado. Cálculo de la diferencia de incremento de la superficie de la cárcava para cada microcuenca (ΔEt).

La **diferencia de incremento de la superficie erosionada (ΔEt)** para cada microcuenca se obtuvo calculando el porcentaje de la superficie ocupada por la cárcava sobre el área total de cada microcuenca en cada año del corte temporal: 1966, 1980, 2004 y 2010. Luego se calculó la diferencia entre el porcentaje del área que ocupaba cada cárcava entre 1966 y 2010 para cada microcuenca.

Paso 6.- Caracterización de variables antrópicas: usos del suelo

Con el mapa de base proporcionado por el MGAP - RENARE y la información demográfica en formato digital, se confeccionaron las coberturas correspondientes a la caracterización antrópicas del área por zonas censales:

- División censal INE 2004.
- Densidad demográfica por zona censal para 2004.

Utilizando la información aportada por DIEA-MGAP (Censos y Anuarios Estadísticos Agropecuarios), fotointerpretación y salidas de campo se confeccionaron las siguientes coberturas temáticas:

- Uso actual del suelo.
- Usos del suelo en el corte temporal considerado.

Paso 7.- Estudio de la incidencia de las variables físicas y morfométricas

- ◆ Análisis de relaciones de dependencia, a los efectos de evaluar jerarquizadamente la incidencia de las variables físicas y morfométricas y asociarlas a la diferencia en el incremento en el área de la superficie de las cárcavas (ΔEt), en cada microcuencas

Paso 8.- Grado de significancia (t) y dependencia (r) entre TCA y variables físicas y morfométricas

- ◆ Análisis de la relación de dependencia entre cada una de las variables físicas y morfométricas y la diferencia de incremento de la superficie de las cárcavas para cada microcuenca (ΔEt) para comprender los procesos erosivos. Se realizó una prueba t-student, para analizar la significancia formulándose como estadístico:

$$tc = r [(n - 2) / (1 - R^2)]^{1/2}$$

Las Hipótesis planteadas :

Ho = No existe relación entre variables

H1 = Las variables son dependientes

Paso 9.- Aplicación del modelo explicativo para las cárcavas en estudio.

- ◆ Una vez identificados en forma ponderada y jerarquizados cuantitativamente los factores forzantes del proceso de erosión que inciden en el incremento en el área de la superficie de las mismas, aplicar el modelo matemático propuesto por Pesce (2010) que permitiera expresar ese fenómeno. La ecuación para expresar la extensión de la superficie de las cárcavas en un momento t sería:

$$E(x)t = (Si) [(Tcr) (\Delta t) + 1]$$

Donde:

E(x) t = Extensión superficial esperada de la cárcava en un momento t.

Si = Superficie de la cárcava en momento inicial.

Tcr = Tasa de incremento relativa de la cárcava. $[(SF) - (SI)/SI] / \Delta T$

SF = Superficie final de la cárcava (en hectáreas)

SI = Superficie inicial de la cárcava (en hectáreas)

ΔT = Variación temporal considerada (años)

Δt = Período considerado expresado en años.

Las premisas del modelo son:

- a) Que el escenario geográfico presenta características ambientales homogéneas para todas las cárcavas, de tal forma que la fragilidad del territorio no constituya una variable diferenciadora a considerar.
- b) Que para períodos prolongados de tiempo (> 20 años), sin existir transformaciones en los usos del suelo, los factores forzantes morfométricos, físicos y antrópicos del proceso erosivo mantienen una interrelación ponderada con la tasa de incremento del área de la superficie de las cárcavas

Paso 10.- Tipificar las cárcavas según su comportamiento evolutivo.

- ♦ **Procesamiento estadístico de los resultados obtenidos** de los cálculos del Índice de Circularidad y Razón de Elongación y Factor Forma para cada cárcava y tipificación de las mismas agrupándolas según la probabilidad de que disipen o concentren energía erosiva.
- ♦ **Clasificación de las cárcavas** según los factores determinantes en los procesos de extensión horizontal de las mismas.

Paso 11.- Resistencia del Suelo a la Penetración (RP)

- Microcuenca que contiene la cárcava N°1.

El Penetrómetro para medir el grado de compactación.

La penetrometría es una de las herramientas más utilizadas en estudios de la calidad física del suelo (Breune et al., 1996). La compactación del suelo implica alteraciones de varias características del suelo, cuyas consecuencias en los procesos degradativos son ampliamente conocidas (Soane y Van Ouwerkerk, 1994). El diseño de penetrómetros con captores de fuerza y de distancia conectados a sistemas de adquisición de datos, permite conocer con gran rapidez la fuerza que opone el suelo a la entrada del

instrumento. La resistencia del suelo medida por penetrómetro posee una dependencia compleja con los parámetros de suelo, pero la densidad aparente y la humedad parecen ser los factores más importantes que afectan a la resistencia a la penetración de los suelos (Patrizzi et al., 2003).

La resistencia mecánica a la penetración también es utilizada como variable que describe el estado físico del suelo en forma compleja, siendo un método rápido y preciso para determinar la compactación (Plá Sentis, 1993). La resistencia mecánica a la penetración (RMP), depende de la textura, la densidad del suelo, la materia orgánica y el contenido hídrico del suelo (Jorajuría Collazo, 2004).

- ◆ **Medición de la Resistencia del Suelo a la Penetración:** Se utilizó un medidor digital de compactación de suelo “Penetrómetro Fieldscout SC900” que mide y registra en forma digital y cuenta con un sensor sónico de profundidad que nos proporcionó las lecturas de la profundidad en incrementos de 2,5 cm mientras una célula de carga midió la **Resistencia del Suelo a la Penetración**, expresada en Kilo Pascal (KPa).
- ◆ **Georeferenciación de los puntos de muestreo.** Se utilizó GPS, para georeferenciar los puntos de muestreo en las cabeceras principales de la cárcava N°1 (a 4 metros de la línea de corte) y a nivel de la línea de la divisoria de aguas (interfluvio) de la microcuenca que la contiene.
- ◆ **Sistema de Información Geográfico (SIG).** Se ingresó al SIG la totalidad de valores de Resistencia del Suelo (MPa) georeferenciados y con Arc View, se crearon las coberturas de RP a nivel de planta para cada corte de 2,5 cm en profundidad en la microcuenca.
- ◆ Se tomó para el análisis las cabeceras principales 2 y 3 (ver Figura 21) y se calculó la media de los valores obtenidos tanto a nivel de las cabecera donde se tomaron 4 muestras (Figura 22: puntos de muestreo 1, 2, 3 y 4) y a nivel de la divisoria de aguas (Figura 23: puntos de muestreo 5, 6, 7 y 8). Con los promedios obtenidos se crearon las coberturas de RP del perfil de suelo en profundidad a nivel de cabeceras y a nivel del interfluvio. (ver Figuras 24, 25, 26 y 27)

VI.- RESULTADOS

Se seleccionaron 10 cárcavas y las 10 microcuencas que las contienen, en dos zonas rurales del Municipio de San Jacinto, del Departamento de Canelones, Uruguay. Se identificaron como Zona Norte (Cárcavas N° 1, 2, 3, 4, 5, y 6) y Zona Sur (Cárcavas N° 7, 8, 9 y 10).

Figura 12.- Zona Norte (Cárcavas N° 1, 2, 3, 4, 5 y 6)

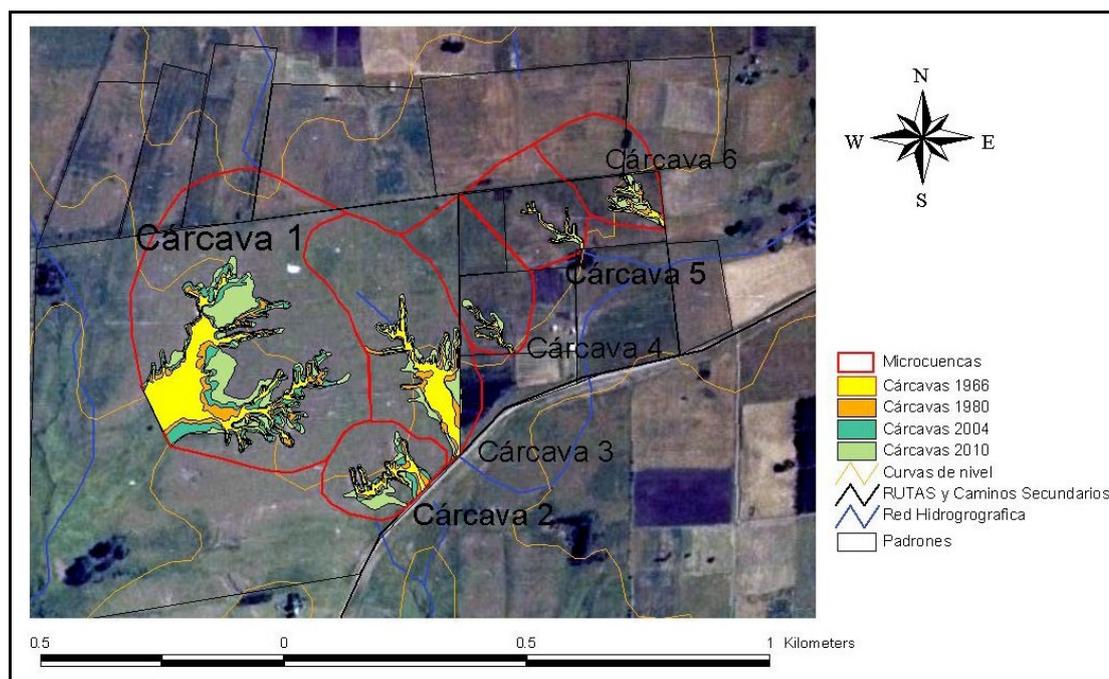
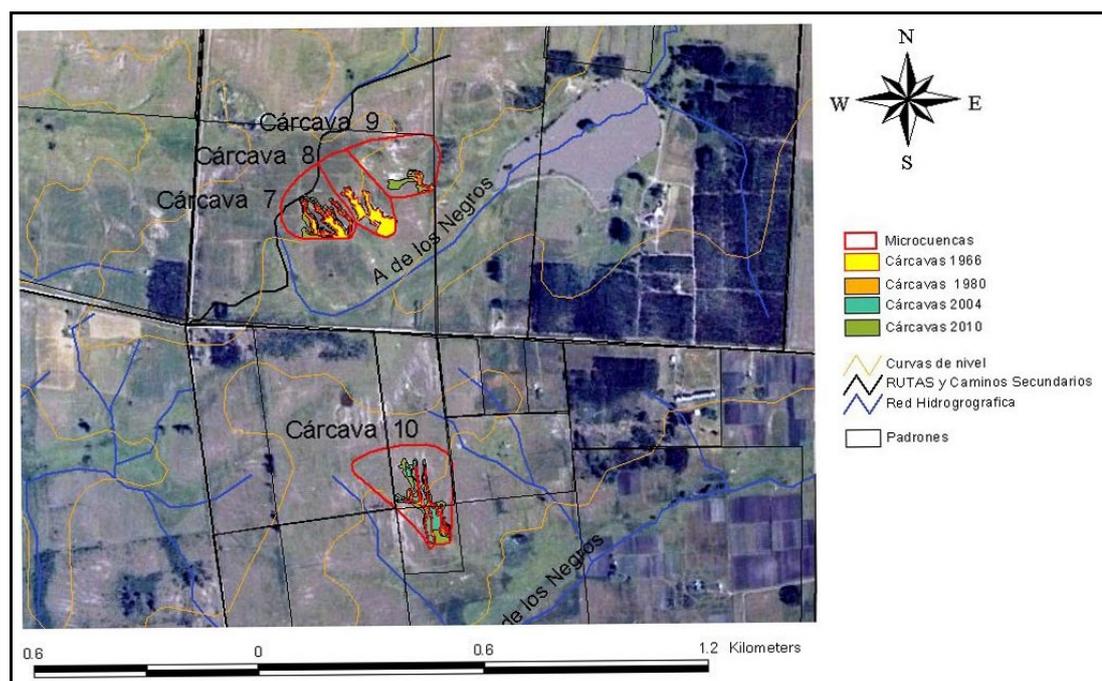


Figura 13.- Zona Sur (Cárcavas N° 7, 8, 9 y 10)



6.1.- RESULTADOS A ESCALA DE MICROCUENCAS:

6.1.1.- Incremento de la superficie de las cárcavas para cada MICROCUENCA (ΔEt).

Entre los años 1966 y 2010, los procesos erosivos que se desarrollaron en las microcuencas y provocaron la extensión en el área de la superficie de las cárcavas fueron continuos. La descripción cuantitativa de este proceso permitió arribar a la diferencia de incremento de la superficie de las cárcavas para cada microcuenca (ΔEt). Los resultados obtenidos del cálculo de ΔEt fueron los siguientes:

Tabla VI.- Porcentaje de la superficie ocupada por las cárcavas en las microcuencas y diferencia entre la superficie final e inicial sobre base 1. (ΔEt).

Microcuenca	% Erosión 1966	% Erosión 1980	% Erosión 2004	% Erosión 2010	ΔEt
1	9,74	13,92	20,65	29,26	0,20
2	7,25	13,01	18,63	29,44	0,22
3	9,02	13,81	16,30	20,51	0,11
4	1,89	3,36	3,93	5,61	0,04
5	2,95	5,11	5,33	4,71	0,02
6	4,13	7,02	10,46	12,45	0,08
7	11,16	16,94	23,38	34,35	0,23
8	20,32	25,12	34,73	tajamar	0,23
9	1,04	2,74	5,65	9,83	0,09
10	4,24	8,31	18,53	27,55	0,23

Figura 14.- Incremento de la superficie de las cárcavas (Zona Norte)

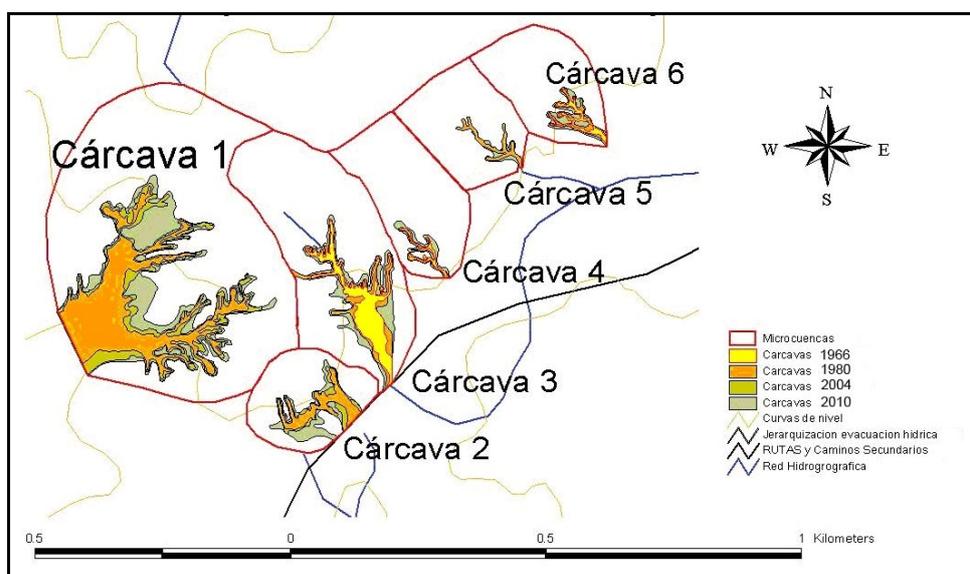
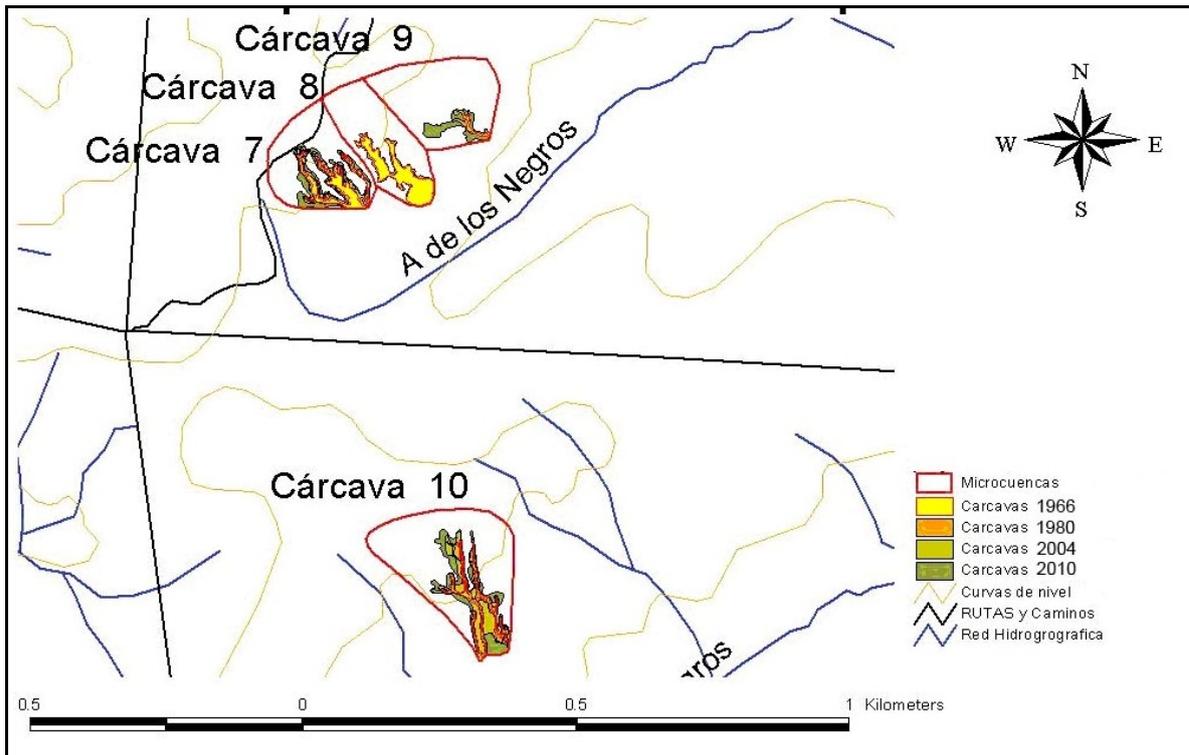


Figura 15.- Incremento de la superficie de las cárcavas (Zona Sur)



La máxima diferencia en el incremento de la superficie erosionada con respecto al total del área de la superficie de cada microcuenca fue del 23 % para la cárcava N° 7 y 10 y la mínima del 2 % para la cárcava N° 5. De acuerdo a estos valores, el resultado de la media es de 14 %, y la consideramos como media de agrupamiento de los resultados para efectuar una tipología primaria de las microcuencas según si el área de la superficie erosionada supera o es inferior a la media.

Tipo 1.- Microcuencas en el que el incremento del área erosionada es menor a la media del agrupamiento de los resultados, a esta categoría corresponden 5 microcuencas, correspondientes a las cárcavas N° 3, N° 4, N° 5, N° 6 y N° 9.

Tipo 2.- Microcuencas en el que el incremento del área erosionada es mayor a la media del agrupamiento de los resultados, a esta categoría. Ocupan esta clase 4 microcuencas, correspondientes a las cárcavas N° 1, N° 2, N° 7 y N° 10.

Figura 16.- Zona Norte: Cárcavas N° 1 y N° 2 donde el % de incremento del área erosionada es mayor a la media

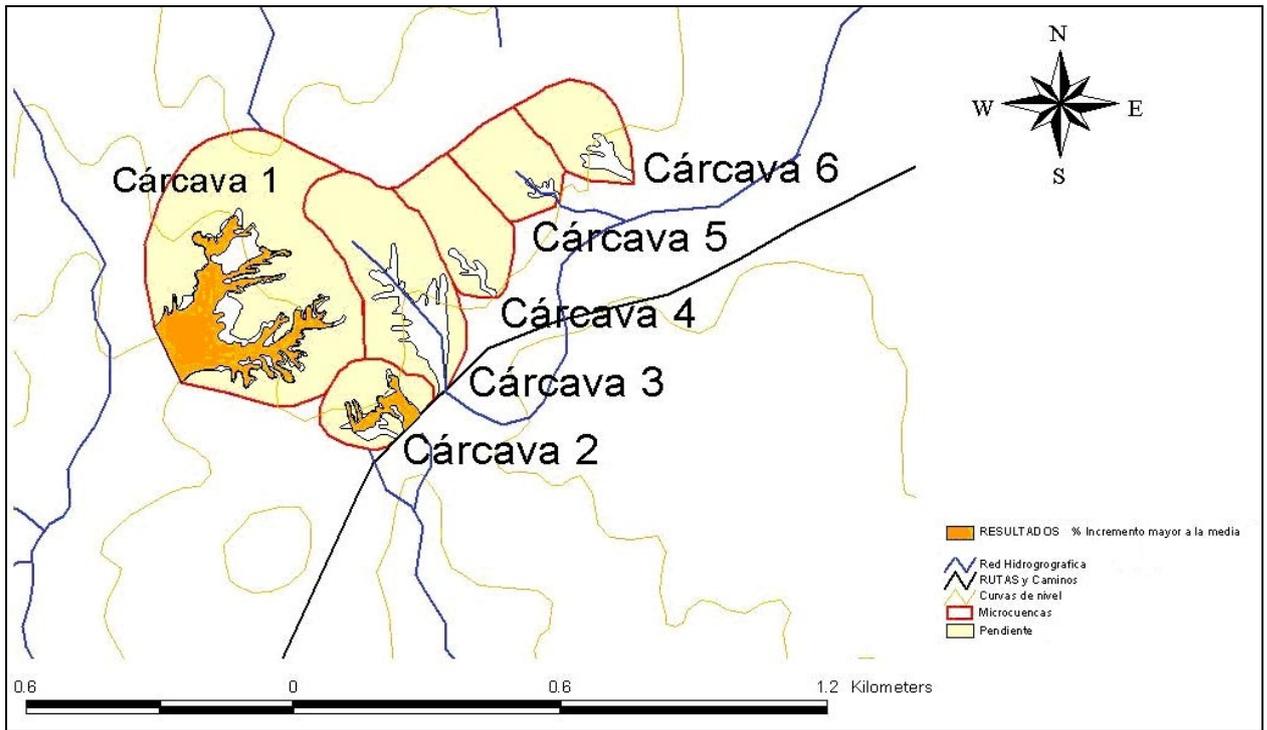
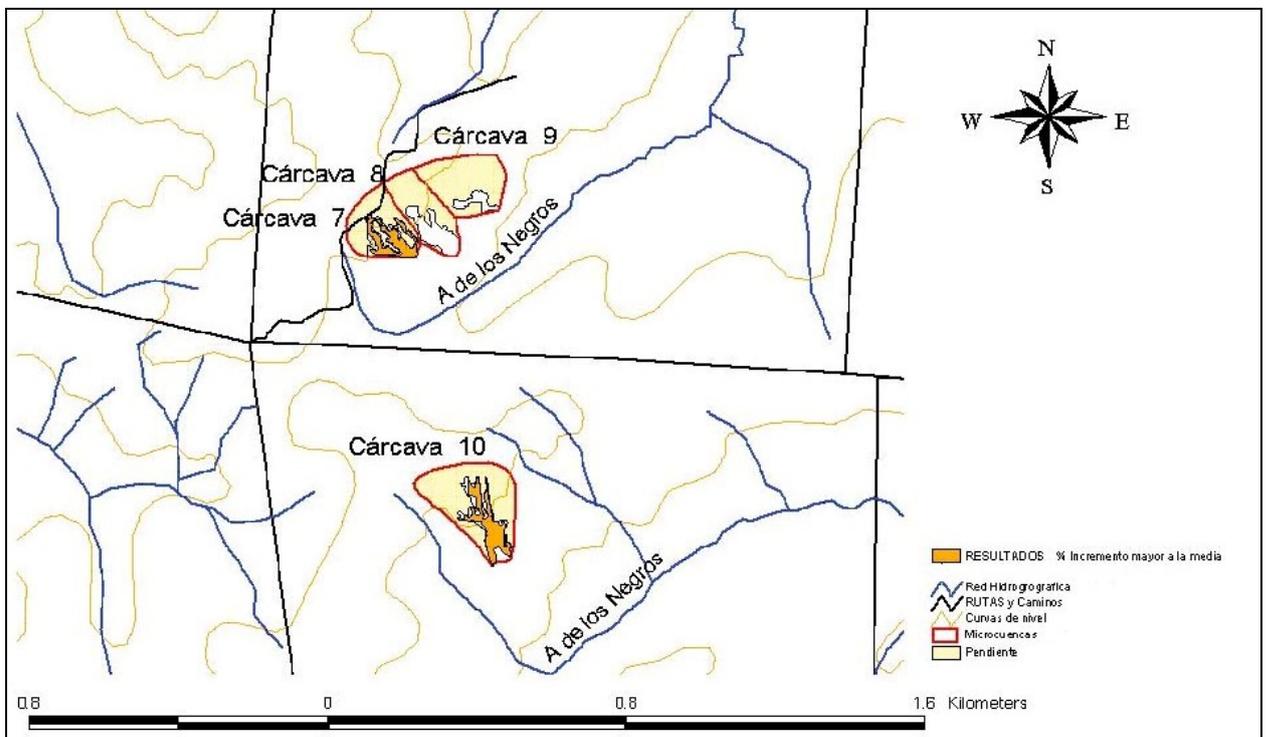


Figura 17.- Zona Sur: Cárcavas N° 7 y N° 10 donde el % de incremento del área erosionada es mayor a la media



La cárcava N° 8 fue transformada en un tajamar en el 2010, por lo que para el análisis estadístico se consideró un incremento de la erosión igual al de las cárcavas contiguas, asumiendo un ΔE_t de 0,23 (idem a la cárcava N° 7).

6.1.2.- MICROCUENCAS: Variables morfométricas

Cálculo de las variables morfométricas: Factor Forma, Índice de Circularidad y la Razón de Elongación, para cada microcuenca donde se inscribe cada cárcava, a partir de las mediciones de las variables geométricas: área (A), perímetro (P), largo máximo (Lmax), ancho máximo (A max) y el cálculo del ancho medio (Am) de la cuenca. Los resultados obtenidos al medir las variables seleccionadas para cuantificar el factor morfométrico fueron:

Tabla VII.- MICROCUENCAS: variables morfométricas

Microcuenca	F. Forma	R. Elongación	I. Circularidad	ΔE_t
1	0,66	0,92	0,78	0,20
2	0,92	1,09	0,90	0,22
3	0,33	0,65	0,64	0,11
4	0,43	0,74	0,71	0,04
5	0,65	0,91	0,83	0,02
6	0,45	0,76	0,79	0,08
7	0,59	0,86	0,85	0,23
8	0,33	0,65	0,69	0,23
9	0,53	0,82	0,81	0,09
10	0,57	0,85	0,74	0,23

Factor Forma = $\frac{Am \text{ (ancho medio de la cuenca)}}{Lmax \text{ (largo máximo de la misma)}}$

Según Soczynska, si: es $>$ a 0,5 = tendencia a la circularidad y a la concentrar energía.

es $<$ a 0,5 = tendencia a la elongación y a disipar energía.

De las 10 microcuencas, 4 de ellas (N° 3, N° 4, N° 6 y N° 8) poseen Factor Forma (F.F) $<$ a 0,5

Figura 18.- RESULTADOS Zona Norte: Microcuencas N° 3, N° 4, N° 6

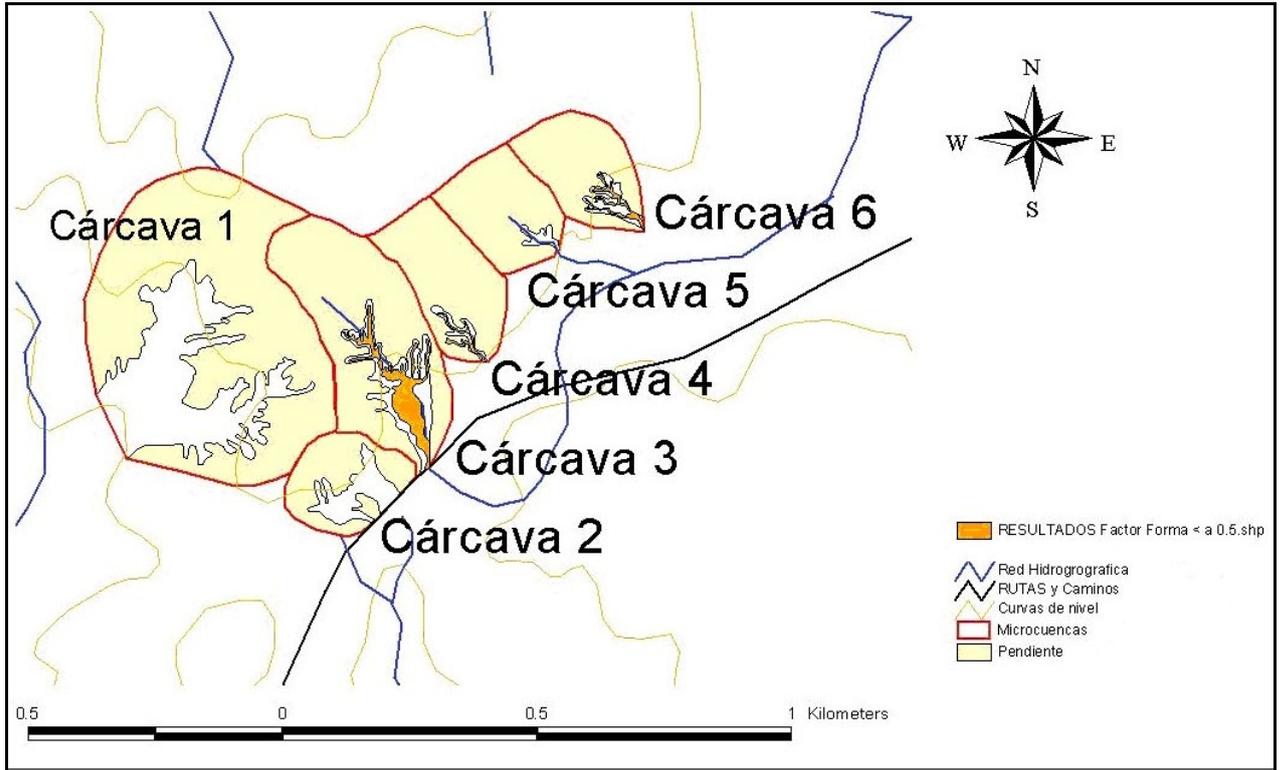
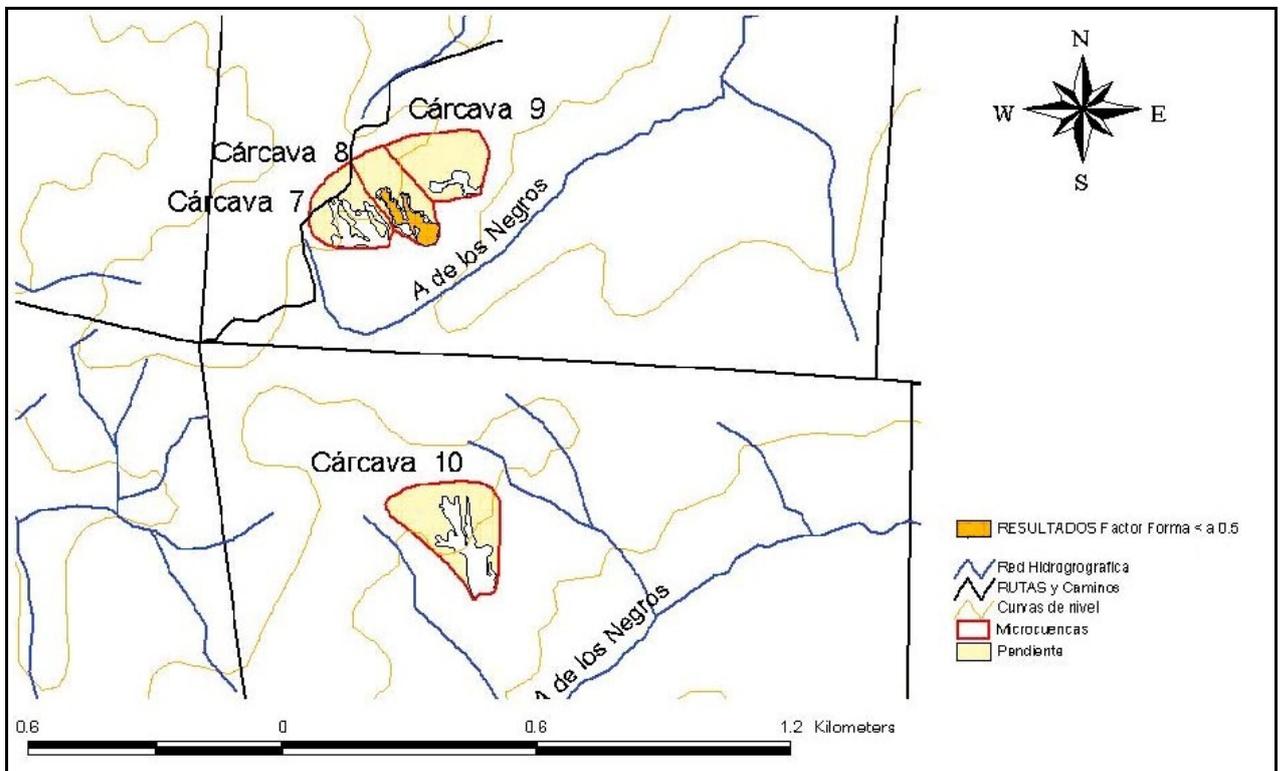


Figura 19.- RESULTADOS Zona Sur: Microcuencia N° 8



Razón de Elongación (RE) = $\frac{D \text{ (diámetro de un círculo de área igual a la de la cuenca)}}{L_{\max} \text{ (largo máximo de la misma)}}$

Según Schumm si la RE se comporta como :

R.E > 0,5 la microcuenca tiende a la circularidad y a concentrar energía

R.E < 0,5 la microcuenca tiende a la elongación y a disipar energía

Las 10 microcuencas, poseen Razón de Elongación (R.E) > a 0,5

Índice de Circularidad (IC) = $\frac{A \text{ (área de la cuenca)}}{A^{\circ}}$

P = perímetro

A[°] = área de un círculo que tiene un P igual al P de la cuenca.

Los valores oscilan entre 0 - 1, y cuanto más tiende a la unidad la forma es más circular.

Según Miller si: I.C > 0,5 la microcuenca tiende a la circularidad y a concentrar energía

I.C < 0,5 la microcuenca tiende a la elongación y a disipar energía

Por lo que las 10 microcuencas, tienen un Índice de Circularidad (I.C) > a 0,5

Cuanto más tiende el valor de este índice a la unidad, como este caso, se considera que las cuencas tienen tendencia a la circularidad y por lo tanto son más compactas, esto significa que la escorrentía que drena desde todos los límites de la cuenca, tienen distancias similares y llega al colector principal al mismo tiempo.

Los resultados de estas variables hidrológicas analizadas, nos muestran que le estarían imprimiendo a las cárcavas una tendencia a concentrar energía erosiva como producto de su geometría.

6.1.3.- MICROCUENCAS, Variables físicas:

La medición de las variables físicas se efectuó con la finalidad de arribar a una tipología de las microcuencas en función de la erodabilidad intrínseca de las mismas dadas las condiciones del terreno.

6.1.3.1- Jerarquía de Evacuación Hídrica (Strhaler)

La jerarquización de los cursos fluviales subdivide los distintos cursos de agua que integran la red de drenaje superficial en segmentos de cauce clasificados en función del orden de los mismos siguiendo la clasificación propuesta por Strahler (1964).

La jerarquización de la evacuación hídrica en la microcuenca y por dentro de la cárcava hasta su desagüe (salida) en un efluente mayor, un camino, etc, proporciona pautas para determinar los sitios donde se juntan 2 efluentes (nudos externos) que dan inicio a las cabeceras, los distintos segmentos fluviales y los nudos internos dentro de la red de drenaje. Tomando estas premisas se subdividió los diferentes tramos de evacuación hídrica dentro de la cárcava, se identificaron los sitios donde se juntan 2 efluentes (nudos internos) y se asignó un orden a cada tramo.

6.1.3.2- Pendiente Media (PM)

La sumatoria de las áreas de las 10 microcuencas que contienen cada una de las cárcavas en estudio, abarcan un área total de 62,437 hectáreas. Para cada microcuenca se cálculo de la PM, tomando como base el mapa de relieve de la NASA y utilizando la extensión Polygeon de Arc View 3.2. La medición de las variables indicativas del factor físico dio como resultado:

Tabla VIII.- MICROCUENCAS: Variables físicas

Microcuenca Nº	Area (ha/100)	Strahler (Nº Orden/10)	Coficiente Rugosidad	Pendiente Media
1	0,231	0,4	0,02	0,02
2	0,037	0,3	0,24	0,19
3	0,099	0,3	0,17	0,18
4	0,048	0,3	0,07	0,13
5	0,040	0,2	0,12	0,14
6	0,040	0,3	0,15	0,15
7	0,027	0,4	0,45	0,19
8	0,024	0,3	0,41	0,19
9	0,030	0,2	0,07	0,22
10	0,046	0,3	0,28	0,17

6.1.3.3.- Resistencia del suelo a la Penetración (Área de Estudio: Cárcava Nº 1)

A partir del análisis estadístico, combinando diferentes variables tanto a nivel de cárcavas como a nivel de microcuencas, en todas las combinaciones posibles de variables, se evidenció el comportamiento diferencial de la cárcava Nº 1, con respecto al resto de las cárcavas.

La cárcava Nº 1 es la más grande de todas las analizadas, en la cual el área de la cárcava se duplicó en 38 años, paso de 2,25 ha en 1966 a 4,77 en 2004. De la microcuenca de 23 hectáreas en la que se emplaza la cárcava Nº 1 en estudio, el área ocupada por ésta era de 9,74 % (2,25 ha.) en 1966, ascendiendo a 20,7 % (4,77 ha) en el año 2004 (calculado a partir de fotografías aéreas). En el 2010 se realizó la medición en campo con GPS, resultando la extensión total de la cárcava 6,76 hectáreas. Este incremento de 29,26 % de la superficie erosionada en el transcurso de casi cinco décadas (45 años), es un indicador de la dinámica geomorfológica de la erosión en esta cárcava.

Se analizó la variable **Resistencia del suelo a la Penetración (RP)**, como representativa del factor físico y en particular de las características estructurales del suelos, (considerando que es buen indicador de: la porosidad, el grado de aireación y la capacidad de drenaje) de la microcuenca en la que se inscriben las cárcavas, y que inciden en la expansión y cambios en las direcciones de avance de cada una de las cabeceras de la cárcava en estudio.

Para analizar esta geoforma, (Fig. 22) de acuerdo a la dirección de avance, se dividió la cárcava según la pendiente en dos partes, una que avanza con dirección principal hacia el Norte (que cuenta con 5 cabeceras principales que avanzan en diferentes direcciones, de NW a E, identificadas con los números del 1 al 5) y otro ramal que avanza con dirección Este (que posee 3 cabeceras principales, identificadas con los números 6, 7 y 8, que avanzan con dirección Este).

En las ocho (8) cabeceras, se determinó con el penetrómetro digital la compactación del Suelo a una distancia de 5 metros del límite de avanzada de la cabecera y en la divisoria de aguas,

Las mediciones se realizaron en junio de 2011, luego de importantes lluvias que llevaron al suelo a capacidad de campo. Ello minimizó el efecto del contenido de agua del suelo sobre la resistencia del suelo, por lo que los resultados de las diferentes muestras realizadas son perfectamente comparables. Estos valores de **resistencia de suelo**, fueron ingresados al Sistema de Información Geográfico (SIG), donde se midió la distancia desde los puntos de muestreo en el límite de avanzada de la cabecera y la divisoria de aguas para su análisis. Los valores de **resistencia de suelo a la penetración**, obtenidos son los siguientes:

Tabla IX.- Valores de Resistencia de suelo(MPa) en 8 cabeceras y distancia al interfluvio (m)

Cabecera	Distancia	Profundidad (cm)									
	(m)	0	2.5	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0	17.5	20.0	
1	21	0,49	0,91	0,98	0,91	0,84	0,81	0,81	0,81	0,74	
divisoria		0,35	0,70	0,88	0,95	0,88	0,88	0,84	0,88	0,81	
2	22	0,74	1,12	0,88	0,81	0,74	0,77	0,88	1,09	1,02	
divisoria		0,91	1,30	1,33	0,91	0,70	0,60	0,67	0,77	0,84	
3	163	0,42	0,88	0,74	0,81	0,77	0,60	0,74	0,98	1,09	
divisoria		0,70	0,91	0,88	0,88	1,09	0,81	0,84	0,81	0,81	
4	74	0,60	0,91	0,91	0,95	0,95	0,84	0,70	0,63	0,60	
divisoria		0,42	0,63	0,88	0,91	0,88	0,95	1,02	0,84	0,60	
5	49	0,21	0,77	0,91	0,95	0,95	0,88	0,84	0,84	0,77	
divisoria		0,84	1,19	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,95	0,91	
6	67	0,28	0,91	0,88	0,95	0,95	0,95	0,98	0,88	0,88	
divisoria		0,00	0,07	0,91	0,91	0,84	0,77	0,60	0,63	0,74	
7	57	0,39	0,63	0,63	0,60	0,63	0,63	0,77	0,81	1,23	
divisoria		0,56	0,81	1,12	1,02	0,88	0,88	0,88	0,84	0,95	
8	40	0,39	0,74	0,95	0,91	0,77	0,77	0,91	1,02	0,88	
divisoria		0,56	0,81	1,12	1,02	0,88	0,88	0,88	0,84	0,95	

Figura 20.- Promedio de Valores de Resistencia del suelo en las cabeceras e interfluvio

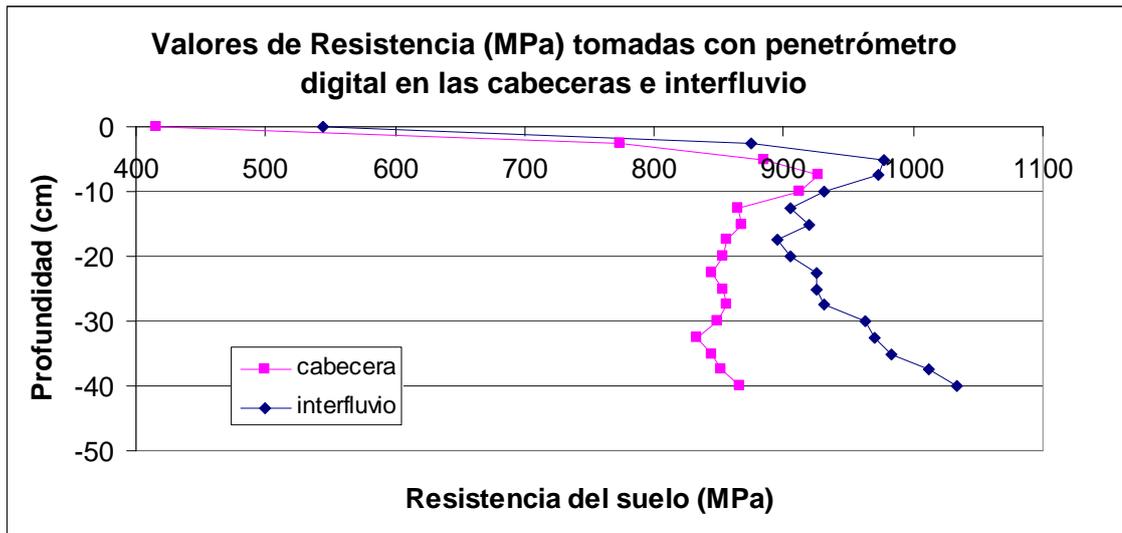
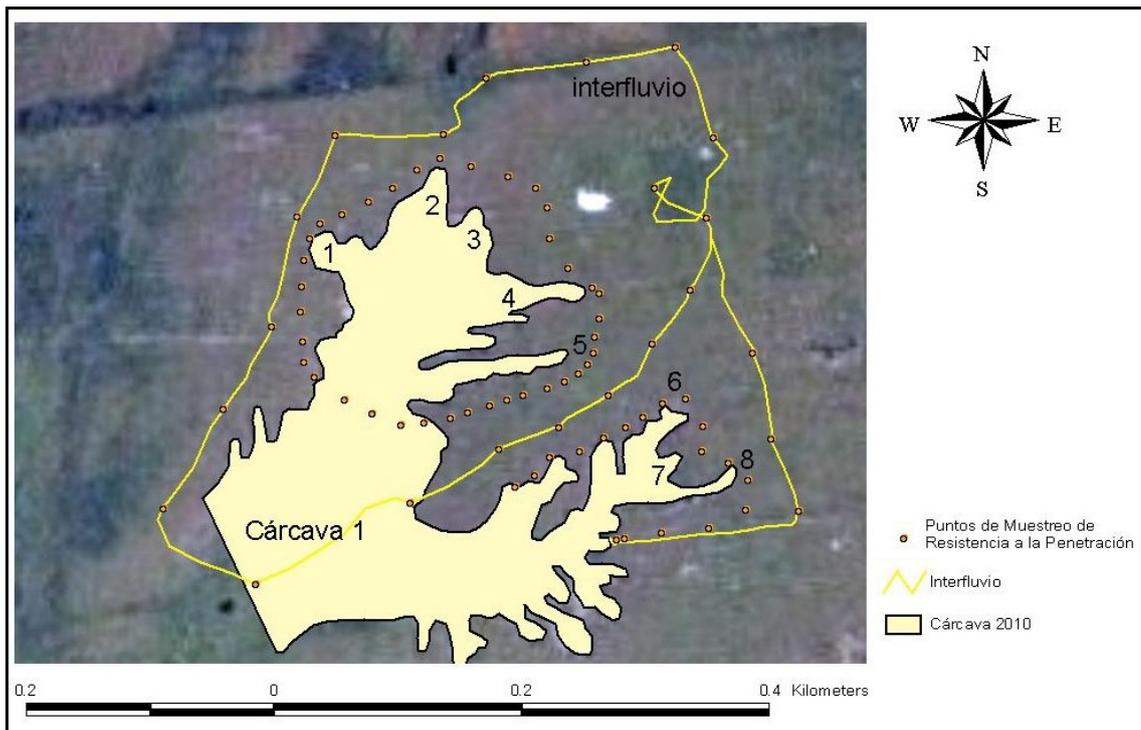


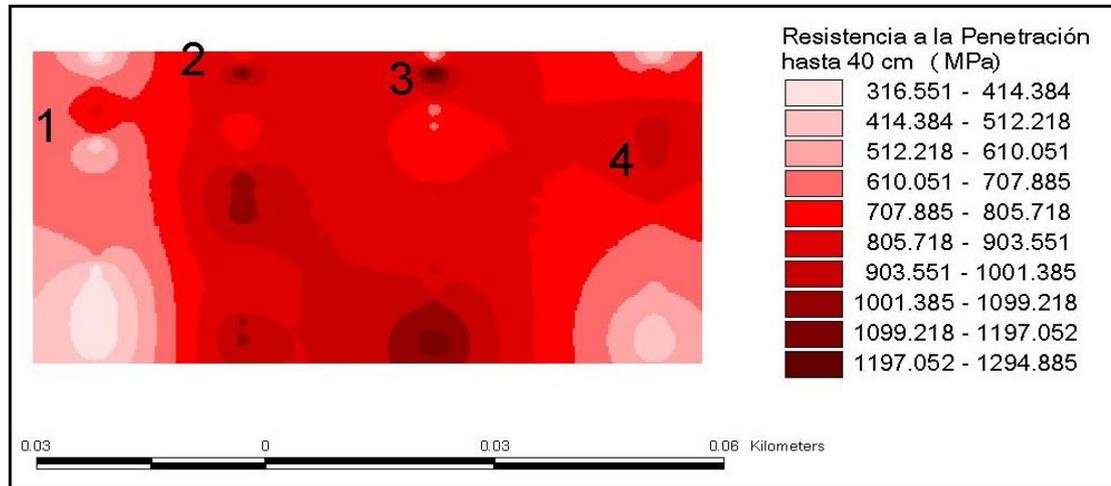
Figura 21.- Cárcava N°1, puntos de muestreo de RP en cabeceras principales e interfluvio.



En la Fig. 23, adjunta se evidencian los cambios en la RP del suelo, medido cada 2,5 cm, a nivel de las cabeceras principales y a nivel de la divisoria de aguas (interfluvio) Se puede apreciar, que los valores de RP a nivel del interfluvio son mayores que a nivel de las cabeceras en todo el perfil de suelo y además en ambas curvas se evidencian dos picos o valores máximos de RP entre los primeros 5cm hasta los 10cm y entre 30 y 40 cm.

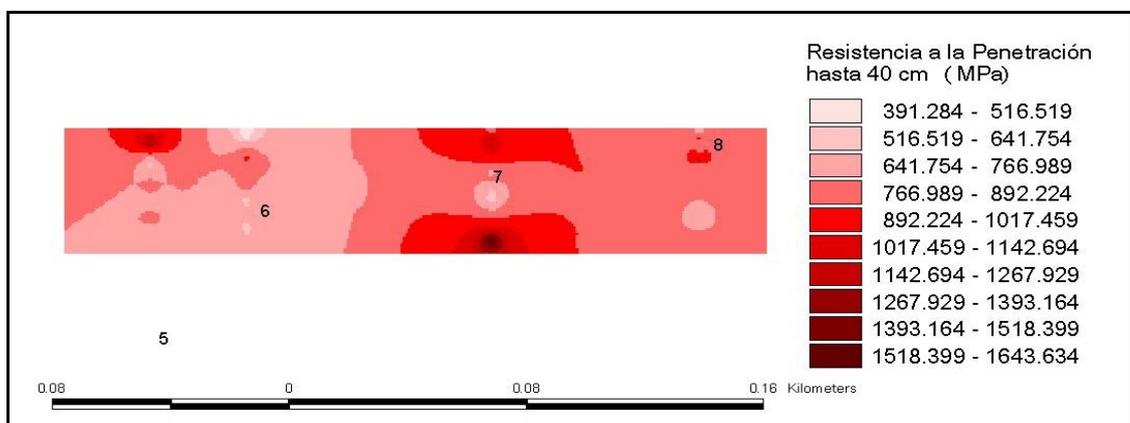
Para visualizar estos resultados a nivel espacial, se ingresaron al SIG, los valores obtenidos de RP del suelo. A continuación se muestran los gráficos obtenidos de los valores de RP en el perfil de suelo hasta 40 cm de profundidad a nivel de cabecera (Figura. 23), y de interfluvio (Figura 24).

Figura 22.- Valores Promedio de Resistencia de suelo a la penetración (MPa) hasta 40 cm de profundidad, medido en las **cabeceras**



De acuerdo a la ubicación de los puntos de muestreo (Fig. 22) los puntos 2 y 3 estarían en dirección al avance de la cabecera, mientras que los puntos 1 y 4 se ubicarían en los márgenes laterales de la misma. Según la Fig. 23 los mayores valores (< 800 MPa) de RP en todo el perfil, coinciden con la dirección de avance de la cabecera (puntos 2 y 3); mientras que en los laterales se aprecian los valores mas bajos (300-400 MPa), tanto en superficie (primeros 5 cm) y en profundidad (30-40cm)

Figura 23.- Valores Promedio de Resistencia de suelo a la penetración (MPa) hasta 40 cm de profundidad, medido en el **interfluvio**



Según la Fig. 23 los mayores valores de RP (< 700 MPa) a nivel del interfluvio, en todo el perfil, coinciden con las muestras tomadas a mayor distancia de la cabecera (puntos 7 y 8); mientras que en los puntos de muestreo más cercanos (puntos 5 y 6); mas bajos (300-400 MPa), tanto en superficie (primeros 5 cm) y en profundidad (30-40cm)

Para visualizar la distribución de RP a nivel de planta (cortes a diferentes profundidades), se realizó un promedio de los valores obtenidos de RP de los puntos muestreados a nivel de cabecera y a nivel de interfluvio en las profundidades donde se evidencian cambios: a) entre 0 y 2,5 cm b) entre 5 y 7,5 c) entre 10 y 27,5 y d) entre 30 y 40 cm.

A continuación se muestran los gráficos obtenidos:

Figura 24.- Valores de Resistencia de suelo a la Penetración (MPa) entre 0 y 2,5 cm

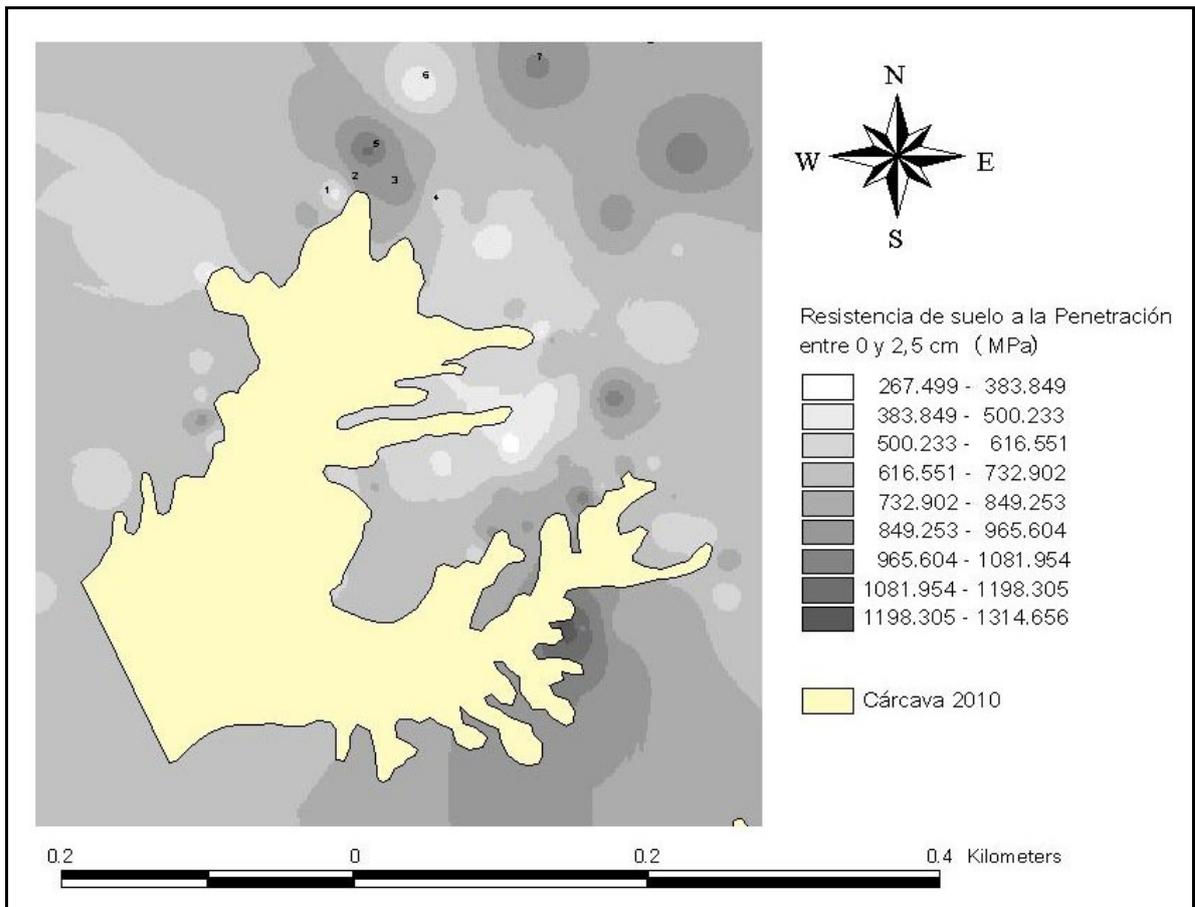


Figura 25.- Valores de Resistencia de suelo a la Penetración (MPa) entre 5 y 7,5 cm

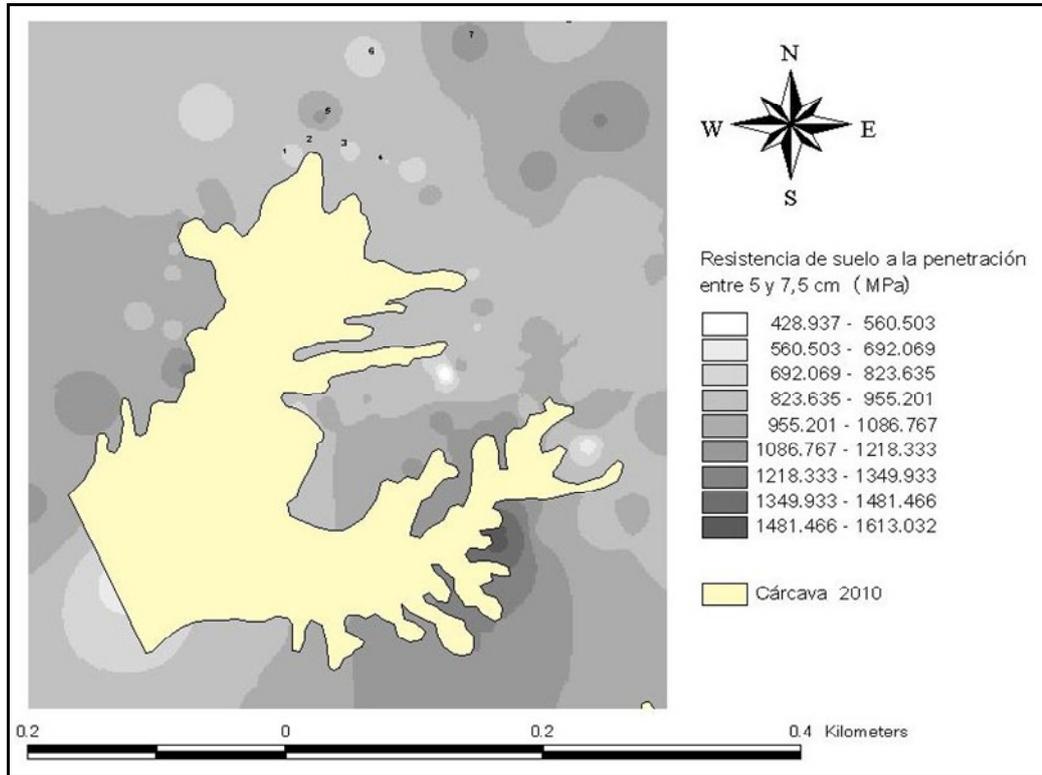


Figura 26.- Valores de Resistencia de suelo a la Penetración (MPa) entre 10 y 27,5 cm

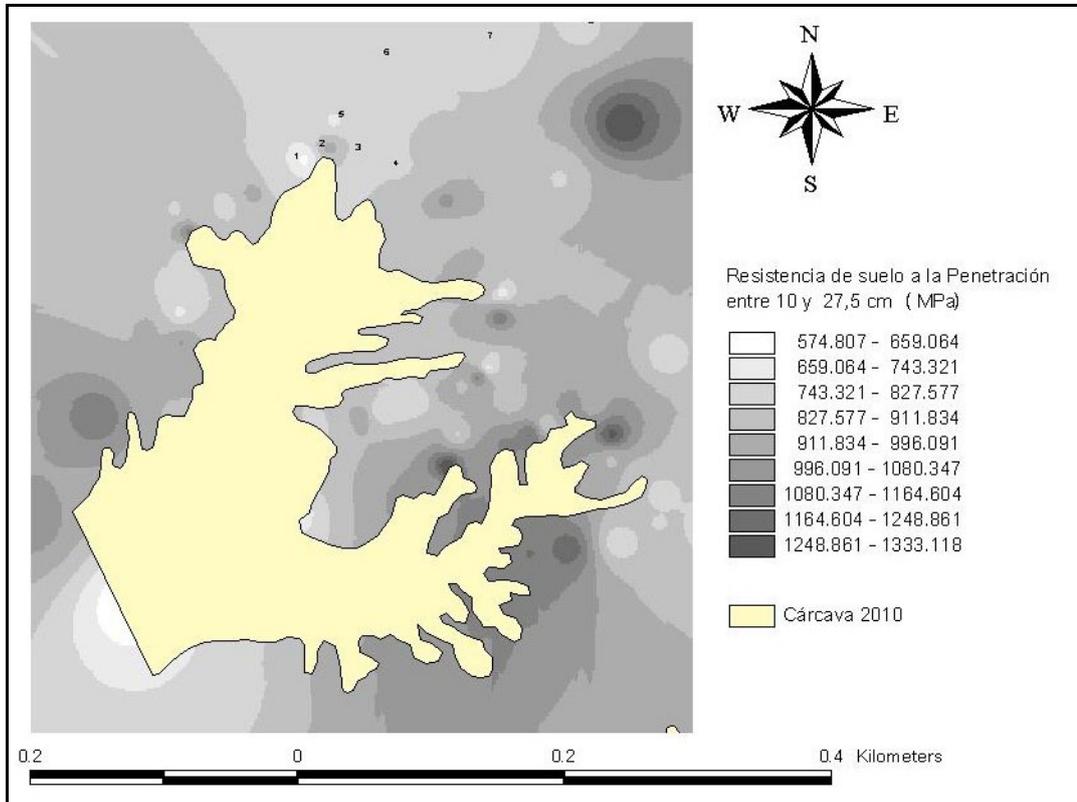
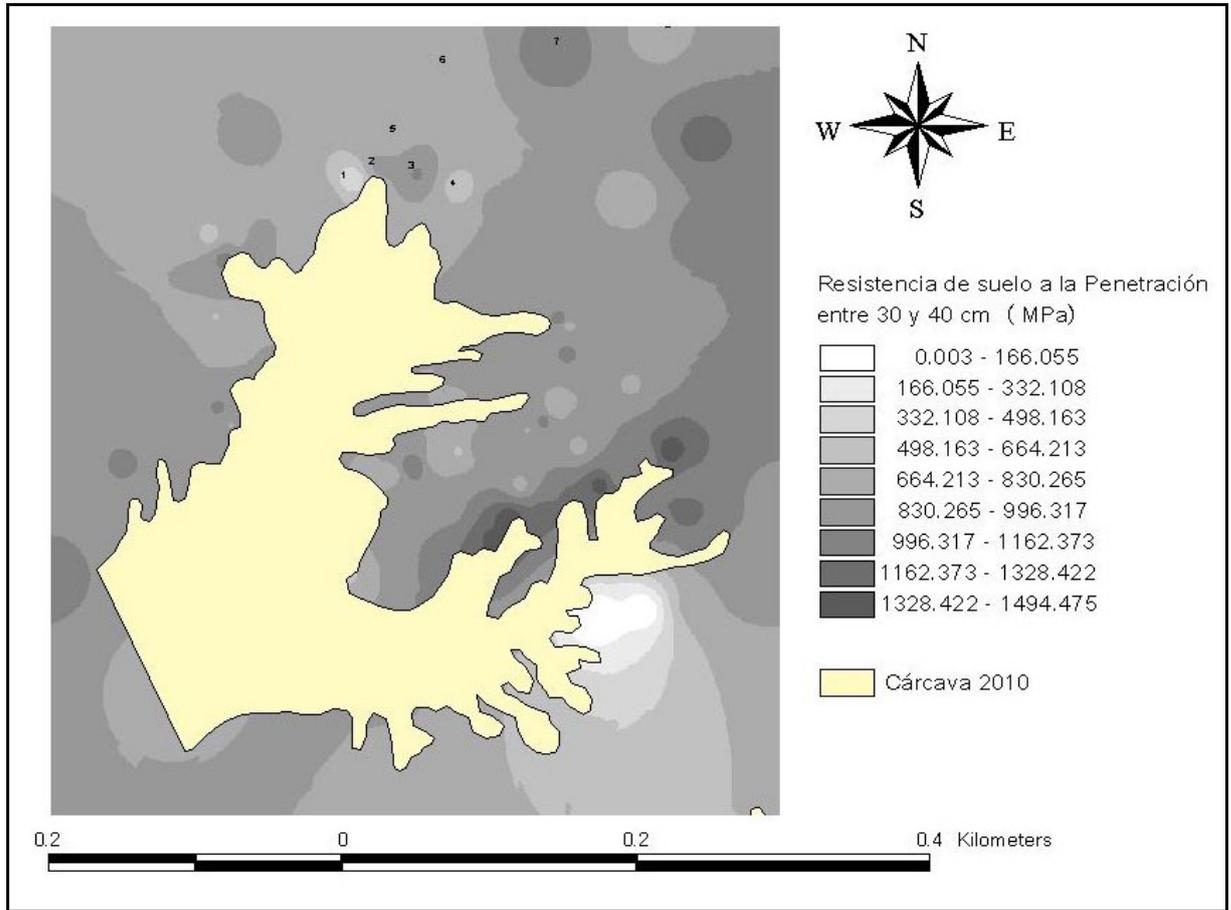


Figura 27.- Valores de Resistencia de suelo a la penetración (MPa) entre 30 y 40 cm



Relación entre variables

La correlación entre la variable “variación del área de la superficie de las cárcavas en las microcuencas” (ΔEt), con las variables físicas: pendiente media, jerarquización de evacuación hídrica y morfométricas: Factor Foma (F.F.), Índice de Circularidad (I.C.) y Razón de Elongación (R.E.), nos permite interpretar las variables que inciden en la extensión horizontal del área de las cárcavas.

Una vez realizado el análisis cuantitativo del Incremento del área de la superficie de las cárcavas a escala de microcuencas, y analizada la relación de dependencia del fenómeno geomorfológico con las variables seleccionadas para describir los factores morfométricos y físicos, se procedió a considerar a las cárcavas como objeto de interpretación.

6.2.- RESULTADOS A ESCALA DE CÁRCAVAS:

El análisis cuantitativo nos permite interpretar las variables que inciden en la extensión horizontal del área de las cárcavas; a partir de correlaciones entre la variable Tasa de Crecimiento Absoluta (TCA) determinada para cada cárcava, con las variables físicas: jerarquización fluvial de Strahler y desnivel topográfico y como variables morfométricas: Factor Forma, Índice de Circularidad y Razón de Elongación.

6.2.1.- Tasa de crecimiento de las cárcavas entre 1966 y 2010 (TCA)

La medición de la extensión de la superficie de las cárcavas y el valor de la tasa de incremento del área de las cárcavas (TCA) entre 1966 y 2010 resulto:

Tabla X.- Evolución de la superficie de las cárcavas (ha) y cálculo de TCA.

CARCAVA Nº	AREA (ha) 1966	AREA (ha) 1980	AREA (ha) 2004	AREA (ha) 2010	TCA
1	2,246	3,22	4,77	6,76	2,01
2	0,271	0,49	0,70	1,10	3,05
3	0,897	1,37	1,62	2,04	1,27
4	0,091	0,16	0,19	0,27	1,88
5	0,119	0,21	0,22	0,19	0,55
6	0,166	0,28	0,42	0,50	2,14
7	0,303	0,46	0,64	0,93	2,08
8	0,495	0,61	0,85	0,22	tajamar
9	0,031	0,08	0,17	0,29	8,47
10	0,197	0,39	0,86	1,28	5,48

6.2.2.- CARCAVAS, Variables morfométricas:

Tabla XI.- CÁRCAVAS: variables morfométricas

F. Forma	R. Elongación	I. Circularidad	TCA
1,00	0,58	0,04	2,02
1,18	0,70	0,09	3,06
0,49	0,38	0,08	1,27
0,37	0,32	0,10	1,88
0,48	0,36	0,09	0,56
0,56	0,45	0,09	2,14
0,65	0,49	0,06	2,08
0,34	0,53	0,20	2,08
0,26	0,39	0,17	8,47
0,49	0,33	0,04	5,49

6.2.3.- CARCAVAS, Variables físicas:

Dentro del factor físico se consideró como variables relevantes: desnivel topográfico a nivel de cárcava y a nivel de microcuenca, la jerarquización de la red de drenaje según Strhaler y el área de la microcuenca, a los efectos de realizar el análisis estadístico y evaluar el grado de dependencia entre estas variables y la tasa de incremento del área de la superficie de las cárcavas (TCA).

6.2.3.1- Desnivel topográfico

Para el cálculo del **Desnivel Topográfico** dentro de la cárcava, marcada por las curvas hipsométricas se consideró la altura a la salida de la cárcava y el promedio de las alturas en las cabeceras principales. Para calcular la desnivelación topográfica a nivel de la microcuenca, se consideró la altura en la divisoria de aguas y a la salida de la cárcava

6.3.- RESULTADOS ESTADÍSTICOS

Para el análisis estadístico se realizaron correlaciones de la totalidad de variables físicas y morfométricas, a nivel de microcuenca y a nivel de cárcavas. Dos (2) de las cárcavas en estudio (Nº5 y Nº8) entre los años 2004 y 2010 sufrieron modificaciones en su área, producto de factores antrópicos (disminuyó la superficie total, producto del manejo). Para evitar el ruido que pudieran tener en los resultados de las correlaciones, estas modificaciones producidas, se realizó tres tipos diferentes de análisis estadísticos considerando diferentes cortes temporales, número de cárcavas y variables intervinientes:

Tabla XII.- Diferentes análisis estadísticos según diferentes: cortes temporales, número de geoformas (cárcavas), y cantidad de variables analizadas.

Análisis	Período (años)	Nº cárcavas	Variables
I	45 (1966-2010)	10	17
II	45 (1966-2010)	8	17
III	38 (1966-2004)	10	15

Análisis I

Se consideró la totalidad de microcuencas que contienen a las cárcavas en estudio ($n = 10$), en un corte temporal de 45 años (1966-2010), y se consideraron para el análisis la totalidad de variables descriptivas seleccionadas de los factores físicos y morfométricos que estarían incidiendo en el crecimiento de la superficie de las cárcavas en estudio.

Resultados de Análisis I

Síntesis de resultados obtenidos a nivel de MICROCUENCA, al correlacionar linealmente las variables morfométricas y físicas con la variación del área de la superficie erosionada (ΔEt) para cada microcuenca y a nivel de CARCAVA. Al correlacionar linealmente las variables morfométricas y físicas con la variación en la Tasa de Crecimiento Absoluta (TCA) de las cárcavas en el período 1966-2010.

Tabla XIII.- Síntesis de Análisis I

MICROCUENCA			
Factores	Variables	Correlaciones	
MORFOMETRICOS	I. Circularidad	$R^2 = 0,0131$ tc (0,32) < tt (1,86)	r = 0,11
	R. Elongación	$R^2 = 0,0493$ tc (0,64) < tt (1,86)	r = 0,22
	F. Forma	$R^2 = 0,0619$ tc (0,73) < tt (1,86)	r = 0,25
FISICOS	Área	$R^2 = 0,0114$ tc (0,30) < tt (1,86)	r = 0,11
	Pendiente Media	$R^2 = 0,0076$ tc (0,25) < tt (1,86)	r = 0,09
	Jerarquización de Evacuación Hídrica	$R^2 = 0,3852$ tc (2,24) > tt (1,86)	r = 0,62
CARCAVA			
Factores	Variables	Correlaciones	
MORFOMÉTRICOS	I. Circularidad	$R^2 = 0,0749$ tc (0,78) < tt (1,86)	r = 0,27
	R. Elongación	$R^2 = 0,0187$ tc (0,40) < tt (1,86)	r = 0,14
	F. Forma	$R^2 = 0,0626$ tc (0,73) < tt (1,86)	r = 0,25
FÍSICOS	Área	$R^2 = 0,0484$ tc (0,64) < tt (1,86)	r = 0,22
	Cárcava: Desnivel Topográfico	$R^2 = 0,0019$ tc (0,12) < tt (1,86)	r = 0,04
	Microcuenca: Desnivel Topográfico	$R^2 = 0,0255$ tc (0,57) < tt (1,86)	r = 0,16
	Jerarquización de Evacuación Hídrica	$R^2 = 0,1223$ tc (1,05) < tt (1,86)	r = 0,35

Análisis II

El período considerado fue de 45 años (1966-2010), se consideró la totalidad de variables (17), y se eliminaron para el análisis las cárcavas N°5 y N° 8, (n= 8) que sufrieron modificaciones antrópicas posterior al año 2004.

Síntesis de resultados a escala de MICROCUENCA, obtenidos al correlacionar linealmente las variables morfométricas y físicas con la variación del área de la superficie erosionada (ΔEt) para cada microcuenca, y a la escala de CARCAVA al correlacionar linealmente las variables morfométricas y físicas con la variación en la Tasa de Crecimiento Absoluta (TCA) de las cárcavas en el período 1966-2010.

Tabla XIV.- Síntesis de Análisis II, hasta 2010 (sin 5 y 8)

MICROCUENCA				
Factores	Variables	Correlaciones $\alpha = 0,05$		$\alpha = 0,10$
MORFOMETRICOS	I. Circularidad	$R^2 = 0,2277$ tc (1,36) < tt (1,94)	r = 0,48	
	R. Elongación	$R^2 = 0,4488$ tc (1,94) = tt (1,94)	r = 0,67	tc (1,94) > tt (1,43)
	F. Forma	$R^2 = 0,4475$ tc (1,96) > tt (1,94)	r = 0,67	tc (1,96) > tt (1,43)
FISICOS	Área	$R^2 = 0,0202$ tc (0,30) < tt (1,94)	r = 0,11	
	Pendiente Media	$R^2 = 0,0014$ tc (0,25) < tt (1,94)	r = 0,09	
	Jerarquización de Evacuación Hídrica	$R^2 = 0,2869$ tc (1,93) < tt (1,94)	r = 0,54	tc (1,93) > tt (1,43)
CARCAVA				
Factores	Variables	Correlaciones $\alpha = 0,05$		$\alpha = 0,10$
MORFOMETRICOS	I. Circularidad	$R^2 = 0,3434$ tc (1,65) < tt (1,94)	r = 0,58	tc (1,65) > tt (1,43)
	R. Elongación	$R^2 = 0,0544$ tc (0,67) < tt (1,94)	r = 0,23	
	F. Forma	$R^2 = 0,1571$ tc (1,15) < tt (1,94)	r = 0,40	
FISICOS	Área	$R^2 = 0,114$ tc (0,97) < tt (1,94)	r = 0,34	
	Cárcava: Desnivel Topográfico	$R^2 = 0,0838$ tc (0,82) < tt (1,94)	r = 0,29	
	Microcuenca: Desnivel Topográfico	$R^2 = 0,1406$ tc (0,57) < tt (1,94)	r = 0,16	
	Jerarquización de Evacuación Hídrica	$R^2 = 0,4855$ tc (2,09) > tt (1,94)	r = 0,69	tc (2,09) > tt (1,43)

Análisis III

El período considerado fue de 38 años (1966-2004), se consideró la totalidad de variables, y geoformas. Síntesis de resultados a escala de MICROCUENCA, obtenidos al correlacionar linealmente las variables morfométricas y físicas con la variación del área de la superficie erosionada (ΔEt) para cada microcuenca, y a la escala de CARCAVA con la variación en la Tasa de Crecimiento Absoluta (TCA)

Tabla XV.- Síntesis de Análisis III, hasta 2004

MICROCUENCA			
Factores	Variables	Correlaciones $\alpha = 0,05$	
MORFOMETRICOS	I. Circularidad	$R^2 = 0,0127$ tc (0,31) < tt (1,86)	r = 0,48
	R. Elongación	$R^2 = 0,0127$ tc (0,31) = tt (1,86)	r = 0,11
	F. Forma	$R^2 = 0,0189$ tc (0,40) < tt (1,86)	r = 0,14
FISICOS	Área	$R^2 = 0,0084$ tc (0,25) < tt (1,86)	r = 0,09
	Pendiente Media	$R^2 = 0,0058$ tc (0,21) < tt (1,86)	r = 0,08
	Jerarquización de Evacuación Hídrica	$R^2 = 0,3309$ tc (2,09) > tt (1,86)	r = 0,58
CARCAVA			
Factores	Variables	Correlaciones $\alpha = 0,05$	
MORFOMÉTRICOS	I. Circularidad	$R^2 = 0,1042$ tc (0,92) < tt (1,86)	r = 0,32
	R. Elongación	$R^2 = 0,0783$ tc (0,81) < tt (1,86)	r = 0,23
	F. Forma	$R^2 = 0,0844$ tc (0,84) < tt (1,86)	r = 0,29
FÍSICOS	Área	$R^2 = 0,0461$ tc (0,63) < tt (1,86)	r = 0,22
	Cárcava: Desnivel Topográfico	$R^2 = 0,0838$ tc (0,24) < tt (1,86)	r = 0,29
	Microcuenca: Desnivel Topográfico	$R^2 = 0,0382$ tc (0,70) < tt (1,86)	r = 0,19
	Jerarquización de Evacuación Hídrica	$R^2 = 0,6360$ tc (0,76) > tt (1,86)	r = 0,25

6.3.1.- Síntesis de RESULTADOS ESTADÍSTICOS

Análisis I (hasta 2010)

A nivel de MICROCUENCAS:

Para $n = 10$, con $v = 8$, $\alpha = 0,05$, $t_c = 2,24$ y $t_t = 1,86$ y dado que $2,24 > 1,86$, **r es significativo**, por lo que **las variables Jerarquización de Evacuación Hídrica (según Strhaler) y ΔEt podrían ser dependientes** aceptándose H1.

Análisis II (hasta 2010, sin geoformas N° 5 y N° 8)

A nivel de MICROCUENCAS:

Para $n = 8$, con $v = 6$, $\alpha = 0,05$, $t_c = 1,96$ y $t_t = 1,94$ y dado que $1,96 > 1,94$, **r es significativo**, por lo que **las variables Factor Forma y ΔEt podrían ser dependientes** aceptándose H1.

Para $n = 8$, con $v = 6$, $\alpha = 0,10$, $t_c = 1,96$ y $t_t = 1,43$ y dado que $1,96 > 1,43$, **r es significativo**, por lo que **las variables Razón de Elongación y ΔEt podrían ser dependientes** aceptándose H1.

A nivel de CARCAVAS:

Para $n = 8$, con $v = 6$, $\alpha = 0,10$, $t_c = 1,65$ y $t_t = 1,43$ y dado que $1,65 > 1,43$, **r es significativo**, por lo que **la variable Índice de Circularidad y TCA podrían ser dependientes** aceptándose H1.

Para $n = 8$, con $v = 6$, $\alpha = 0,05$, $t_c = 2,09$ y $t_t = 1,94$ y dado que $2,09 > 1,94$, **r es significativo**, por lo que **las variables Jerarquización de Evacuación Hídrica (según Strhaler) y TCA podrían ser dependientes** aceptándose H1.

Análisis III (hasta 2004)

A nivel de MICROCUENCAS:

Para $n = 10$, con $v = 8$, $\alpha = 0,05$, $t_c = 2,09$ y $t_t = 1,86$ y dado que $2,09 > 1,86$, **r es significativo**, por lo que **las variables Jerarquización de Evacuación Hídrica (según Strhaler) y ΔEt podrían ser dependientes** aceptándose H1.

Tabla XVI.- Síntesis de Resultados Estadísticos

MICROCUCENCA			
Factores	Variables	Correlaciones $\alpha = 0,05$	
Análisis I (hasta 2010)			
FÍSICOS	Jerarquización de Evacuación Hídrica	$R^2 = 0,3852$ tc (2,24) > tt (1,86)	r = 0,62
Análisis II (hasta 2010, sin geoformas N° 5 y N° 8)			
MORFOMÉTRICOS	R. Elongación	$R^2 = 0,4488$ tc (1,94) = tt (1,94)	r = 0,67
	F. Forma	$R^2 = 0,4475$ tc (1,96) > tt (1,94)	r = 0,67
Análisis III (hasta 2004)			
FÍSICOS	Jerarquización de Evacuación Hídrica	$R^2 = 0,3309$ tc (2,09) > tt (1,86)	r = 0,58
CARCAVA			
Análisis II (hasta 2010, sin geoformas N° 5 y N° 8)			
MORFOMÉTRICOS	I. Circularidad	$R^2 = 0,3434$ tc (1,65) < tt (1,94)	r = 0,58
FÍSICOS	Jerarquización de Evacuación Hídrica	$R^2 = 0,4855$ tc (2,09) > tt (1,94)	r = 0,69

A partir de los análisis estadísticos realizados, (con diferentes cortes temporales 38 años o 45 años, incluyendo la totalidad de cárcavas o eliminando aquellas que sufrieron modificaciones); las correlaciones de la totalidad de variables físicas y morfométricas, a nivel de microcuenca y a nivel de cárcavas, se puede concluir que existe una correlación débil (según valores de r) entre variables, aceptándose la hipótesis planteada (H1): El incremento del área y las modificaciones geométricas de las cárcavas responden a la interacción entre variables físicas y morfométricas que se manifiestan en forma jerárquica y que pautan la extensión horizontal de cada cárcava.

6.3.2.- Análisis de componentes principales

Para llegar a nuestro objetivo de averiguar si las variables analizadas se pueden resumir de alguna forma, si existe algo en común entre ellas, mediante el análisis de componentes principales con el software estadístico SPSS (versión 11.5), se agruparon las variables seleccionadas representativas de los factores físicos y morfométricos en clases o componentes que puedan explicar la mayoría de la varianza observada.

De los resultados obtenidos se evidencia que no existe efecto zona ya que las cárcavas, se agruparon independientemente de la zona a la cual pertenecen y se reitera que las cárcavas N° 1 y 3 muestran un comportamiento diferente al resto del conjunto de cárcavas.

La medida del estadístico KMO resultó de una adecuación aceptable de los datos al modelo de análisis factorial. Asimismo el contraste de Bartlett muestra que no es significativa la hipótesis nula de variables iniciales no correlacionadas, por lo que tiene sentido el análisis factorial. A su vez el análisis de la varianza mostró que dos variables explican el 94 % de la dinámica del sistema geomorfológico a escala de cárcavas. (Anexo III).

VII. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

7.1.- A ESCALA DE MICROCUENCAS:

El incremento en la superficie de las cárcavas es respuesta a la integración de variables físicas, morfométricas y antrópicas y a las complejas interrelaciones entre las mismas. Las principales variables de origen terrestre son el escurrimiento fluvial, la pendiente y la fragilidad física del terreno, a las que necesariamente se les debe adicionar la morfometría de las cárcavas. (Pesce, 2010). Del procesamiento de los resultados se observó que existe una relación diferencial de dependencia entre las variables seleccionadas para describir los factores morfométricos y físicos que se supusieron incidían en el crecimiento de las cárcavas a escala de microcuencas.

Variables MORFOMÉTRICAS

Los valores obtenidos de r , muestran que la intensidad en la relación de dependencia es baja entre la variación del área de la superficie de las cárcavas sobre la superficie total de cada microcuenca (ΔEt) con todas las variables morfométricas analizadas (Índice de Circularidad, Razón de Elongación y Factor Forma). Aplicado el estadístico t-student, se pudo comprobar que no existía una relación de dependencia entre estas variables con el avance del área de la superficie erosionada de las microcuencas.

Variables FÍSICAS

A partir de la correlación de las variables físicas con la variación del área de la superficie erosionada por las cárcavas (ΔEt) para cada microcuenca, los valores obtenidos indican que existe una relación de asociación directa entre el incremento en el área de la superficie de las cárcavas con la **Jerarquización de Evacuación Hídrica**, al mismo tiempo se pudo deducir que existiría una relación de dependencia entre esta variable con el aumento de la superficie erosionada por microcuenca, dado los resultados obtenidos al aplicar el estadístico t- student.

Las variables **Área** de la microcuenca y **Pendiente Media**, muestran una correlación muy débil (dado los valores de r), en relación con la extensión de la superficie erosionada y al aplicar el estadístico t-student, se pudo comprobar que no existía una relación de dependencia entre estas variables con el avance del área de la superficie erosionada de las microcuencas.

Los procesos de erosión hídrica, están estrechamente relacionados con el ciclo hidrológico, en particular, las rutas y el movimiento del agua por el interior y sobre la superficie del suelo, la literatura (Seginer, 1966) evidencia la importancia del área y la pendiente en los procesos erosivos en cárcavas. Otros autores (Schumm 1971) se refieren a un **umbral topográfico** crítico y en particular (Sganga,1999) a partir del estudios realizados durante tres años (1995 y 1998) del proceso de acarcavamiento en diferentes zonas de Uruguay, concluyó como pendientes críticas aquellas superiores a 2,5 %, que estarían favoreciendo la formación y/o el avance de las cabeceras de las cárcavas hacia las divisorias de agua, (“remontar”), como es el caso de las series de cárcavas en estudio, donde todas las microcuencas analizadas se desarrollan sobre lomadas suaves con pendientes superiores a 2 %.

Según la literatura, la causa principal de la formación de cárcavas, es el exceso de agua, ya sea por efectos climáticos y/o alteraciones en el uso del suelo. El área de la cuenca de captación (que controla la descarga) es una de las principales variables que determinan el proceso erosivo (si no hay agua, no hay flujo, y por lo tanto no hay erosión hídrica).

Según [Morgan 1997](#), los intentos para relacionar la formación de cárcavas con la variación de los factores externos no han sido totalmente satisfactorios a causa que no todas las cárcavas en una zona parecen responder al mismo tipo de formación. [Schumm \(1971\)](#) tratando de explicar el comienzo de la inestabilidad en una cárcava, mientras las áreas limítrofes permanecen estables, examinó umbrales intrínsecos que estaban relacionados con el proceso interno de la cárcava y estableció una función discriminante entre condiciones estables e inestables en función del tamaño del área de captación (cuenca) y la pendiente del cauce.

En nuestro estudio, si bien existe relación entre la variable física área de la microcuenca y el área de la superficie erosionada por las cárcavas (ΔEt) esta relación de acuerdo a los datos obtenidos de r es muy débil.

La medición del área de la microcuenca, se realizó según la Metodología definida (ver Fig. 8 y Fig.9), a partir del uso de par de estereoscopios de espejo y análisis de las fotografías aéreas en los diferentes cortes temporales (1966, 1980 y 2004) y posteriormente en las diferentes salidas de campo, fue corroborada en el terreno con la utilización de GPS. La determinación de la divisoria de aguas, tanto en el trabajo de laboratorio (estereoscopio y fotografías aéreas) como a nivel de terreno, - aunque se cuente con experiencia de campo en esta tarea, como fue en este caso-, es de difícil determinación y puede haber generado algún tipo de ruido. Otra fuente de error puede ser al delimitar la divisoria de aguas entre cárcavas cuando analizamos series de cárcavas como es el caso de estudio (serie de cárcavas N°1, N°2 y N°3 al Norte y serie de cárcavas N° 7, N° 8 y N° 9 al Sur) este procedimiento es más complejo que medir, el área de una cuenca de captación hídrica, en la que se inscribe una cárcava aislada, esto también puede haber generado algún tipo de ruido.

Por último, el corte temporal analizado fue a partir de los únicos registros fotográficos con que se cuenta a nivel nacional, (vuelos del 1966, 1980 y 2004), en ese momento la mayoría de las cárcavas ya tenían un desarrollo importante, según [Cespedes com pers 2011](#). se puede decir que algunas de ellas se encuentran “fossilizadas” ya que si bien se evidencia un crecimiento en estos

últimos 45 años (16% promedio), se encuentran sobre o muy cerca de la divisoria de aguas, por lo que no tendrían más área para continuar creciendo. Aunque en algunas ocasiones este crecimiento puede continuar, romper la divisoria y juntarse con la cárcava contigua que expresa un desarrollo similar en una microcuenca contigua.

[Jaque y Manzanares \(2005\)](#) demostraron que, en microcuencas de superficie con un área menor a 20 hectáreas (< 20 ha) y jerarquización de ordenes fluviales menor a 4 (< 4), la variable física que predeciría la erodabilidad es, en primer lugar, la pendiente media y en segundo lugar, la red de drenaje, antes [Ciacassy y Palmieri \(1986\)](#) de la misma forma consideran que la desnivelación y la densidad de la red de drenaje debida a la profundización del cauce, podrían ser consideradas para evaluar la erodabilidad del terreno.

Esto se corresponde con el tamaño de las microcuencas analizadas, donde a excepción de la microcuenca que contiene a la cárcava N° 1 (de 23 ha) y la microcuenca que contiene a la cárcava N° 3 (10 ha), el área de las restantes 8 microcuencas son mas pequeñas: dos de 5 ha, dos de 4 ha y tres de 3 ha. (valores aproximados). Sumando un área total de 64 ha. las unidades hidrogeomorfológicas en estudio.

Del mismo modo analizada la **Jerarquización de Evacuación Hídrica** las mismas, a excepción de las microcuencas 1 y 7 (de orden 4), son de orden 2 o 3, por lo que de acuerdo a lo demostrado por Jaque y Manzanares la densidad de la red de drenaje (jerarquización Strhaler) sería la variable que estaría explicando la erodabilidad del terreno.

En síntesis, los resultados a escala de MICROCUENCA, podrían ser interpretados como que la variable física Jerarquización de Evacuación Hídrica (Strhaler) es la que más está incidiendo en el proceso geomorfológico de extensión de las cárcavas a nivel de microcuencas para este estudio.

7.2.- A ESCALA DE CÁRCAVAS:

Relación de variables

Del conjunto de las variables físicas y morfométricas analizadas, puede resumirse que muestran una relación débil con la variación del área ocupada por la cárcava (TCA) y al evaluar la significatividad de r a través del estadístico t -student, se deduce que la intensidad en la relación de dependencia entre éstas y la variación del área de la cárcava no resultaron significativas.

7.3.- Cabeceras ACTIVAS

Se dice que una cárcava esta activa cuando la erosión hídrica es manifiesta, observándose un crecimiento en todas las dimensiones de la misma (largo, ancho y profundidad) e inactiva o fijada, cuando estos incrementos tienden a ser nulos. Siguiendo a [Piest y col. \(1975\)](#) entendemos que una cárcava está activa cuando presenta una exagerada pendiente, paredes escarpadas, normalmente varios metros de profundidad y ausencia de vegetación. [Oostwoud y col. \(2000\)](#) siguen un criterio de clasificación de cárcavas activas muy similar. Estos autores consideran que una cárcava está activa cuando tiene bordes afilados o angulosos, grietas cercanas a los bordes, depresión en cabecera, sedimentos depositados recientemente y túneles de erosión. Las cárcavas activas que continúan en expansión a partir de sus cabeceras superiores son aquellas integradas en microcuencas amplias y que tienen posibilidad de crecimiento.

En aquellas cárcavas que no se ha producido crecimiento, se ha debido o bien a que el agricultor se ha encargado de mantenerlas y estabilizarlas o bien como demuestran [Radoane y col. \(1995\)](#) estas cárcavas crecen como proceso natural de erosión, pero cuando alcanzan una longitud de equilibrio su actividad se reduce o incluso cesa.

En este estudio se evidencia un crecimiento promedio de 16 % en 45 años, y en todas las cabeceras se evidencia un crecimiento longitudinal en las cabeceras principales en dirección a las divisorias de agua de la microcuenca que la contiene.

Figura 28.- Cabecera principal con desmoronamiento



Foto Cárcava N° 1, San Jacinto, Canelones

El escurrimiento superficial, llega a la cárcava con poder erosivo y, si la estructura geológica es friable, contribuye con los procesos de desmoronamiento de los materiales inestabilizados por la emergencia de los flujos de la escorrentía subsuperficial en momentos de régimen hidrogeológico con períodos de balance hídrico positivo.

El agua de escurrimiento subsuperficial, al aflorar en las cabeceras de las cárcavas (puntos de ruptura) socava las paredes de las cabeceras de las mismas provocando el desmoronamiento de los materiales. [Takahashi et. al. \(2008\)](#) demostraron que el flujo hiporreico en las proximidades de las cabeceras, tiene mayor conductividad hidráulica pero que, en si mismo no dispondría de la energía suficiente como para acelerar el proceso erosivo sino que se combinan con escorrentía superficial para incidir en la evolución geomorfológicas del cauce. Por lo que la acción combinada de los flujos de escurrimiento superficial y subsuperficial incrementaría la extensión longitudinal de las cárcavas a partir de los puntos de ruptura de las cabeceras de las mismas, hasta que llegan a su máximo desarrollo, o sea, alcanzan el interfluvio.

VIII. MODELO INTERPRETATIVO

Una vez identificados y jerarquizados cuantitativamente los factores condicionantes y forzantes del proceso de erosión en cárcavas que inciden (a nivel de microcuenca como a nivel de cárcavas), en el incremento en el área de la superficie de las mismas, se aplicó el modelo matemático propuesto por [Pesce \(2010\)](#) que permitiera expresar ese fenómeno para dos de las cárcavas en estudio, que por acciones antrópicas fueron modificadas.

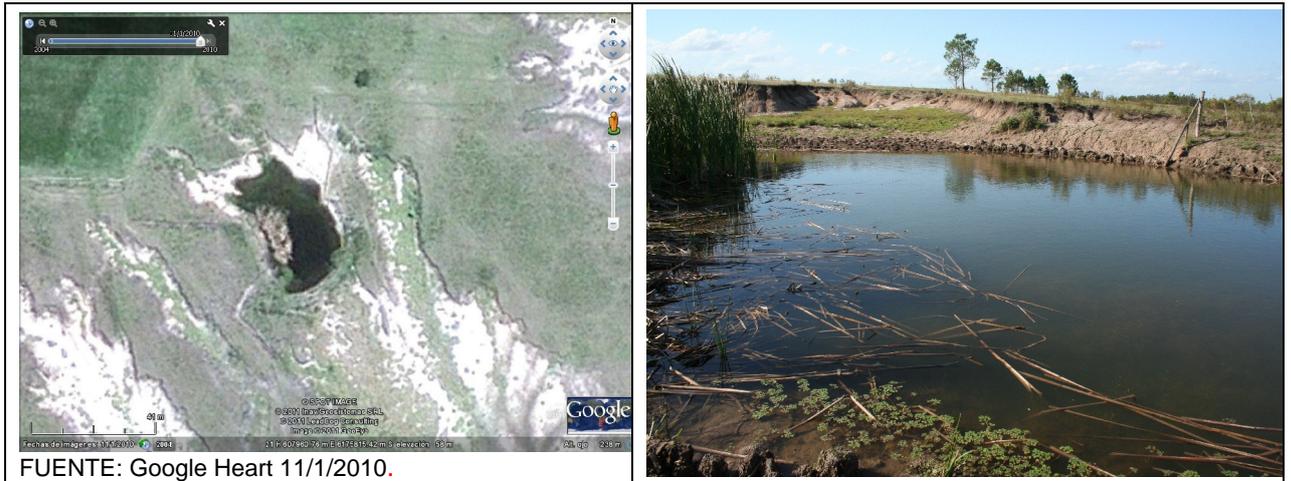
La cárcava N° 8 fue transformada en un tajamar, (Fig. 29) por lo que el último registro para poder medir el área de la superficie que se cuenta, fue la fotografía aérea del SGM del año 2004. En el caso de la cárcava N° 5 a partir de la fotointerpretación de las fotografías aéreas de los diferentes cortes temporales (1966, 1980 y 2004) se evidencia que fue eliminada una de las cabeceras principales, a partir de la acción antrópica entre 1980 y 2004, por lo que el área de la superficie de la misma disminuyó en el 2004. Para ambas, se calculó cual sería el área erosionada en el año 2010, en el supuesto que no hubiera existido acción antrópicas en las mismas).

En las cárcavas N° 5 y N° 8, por la acción antrópica entre los años 2004 y 2010, el área se vio disminuida. La cárcava N° 8 fue transformada en un tajamar y en la cárcava N° 5, fueron aradas 2 de sus cabeceras, por lo que el área de cada una paso de ser:

Tabla XVII.- Cárcavas N° 5 y N° 8,: Área en hectáreas (ha) en cada corte temporal

Cárcava N°	1966	1980	2004	2010
5	0,12	0,21	0,22	0,19
8	0,50	0,61	0,85	0,22

Figura 29.- Cárcava N° 8 transformada por acción antrópica en un Tajamar.



Ecuación para expresar la extensión de la superficie de las cárcavas en un momento t:

$$E(x)t = (Si) [(Tcr) (\Delta t) + 1]$$

Donde:

E(x) t = Extensión superficial esperada de la cárcava en un momento t.

Si = Superficie de la cárcava en momento inicial.

Tcr = Tasa de incremento relativa de la cárcava. $[(SF) - (SI)/SI] / \Delta T$

SF = Superficie final de la cárcava (en hectáreas)

SI = Superficie inicial de la cárcava (en hectáreas)

ΔT = Variación temporal considerada (en años)

Δt = Período considerado expresado (en años)

Las premisas del modelo son:

a) Que el escenario geográfico presenta características ambientales homogéneas para todas las cárcavas, de tal forma que la fragilidad del territorio no constituya una variable diferenciadora a considerar.

b) Que para períodos prolongados de tiempo (>20 años), sin existir transformaciones en los usos del suelo, los factores forzantes morfométricos, físicos y antrópicos del proceso erosivo mantienen una interrelación ponderada con la tasa de incremento del área de la superficie de las cárcavas.

La extensión de la superficie de las cárcava N° 5, en el 2010 aplicando la ecuación:

$$E(2010) = (Si) [(Tcr) (\Delta t) + 1]$$

Siendo

E(2010) t = Extensión superficial esperada de la cárcava en 2010

Si = Superficie de la cárcava en 1966

Tcr = Tasa de incremento relativa de la cárcava. $[(SF) - (SI)/SI] / \Delta T$

SF = Superficie final de la cárcava en 2004 = 0,22 ha

SI = Superficie inicial de la cárcava en 1966 = 0,12 ha

ΔT = Variación temporal considerada = 38 años

Δt = Período considerado (1966 -2010) = 45 años.

Se calculó la Tasa de incremento relativa de la cárcava (**Tcr**) para el período de 38 años entre

1966 y 2004, según la ecuación: **Tcr** = $[(SF) - (SI)/SI] / \Delta T$

$$Tcr = [0,22 - 0,12 / 0,12] / 38 = 0,02$$

$$E(2010) = (0,12) [(0,02) (45) + 1] = \mathbf{0,24}$$

La extensión de la superficie de las cárcava N° 8, en el 2010 sería:

$$Tcr = [0,85 - 0,50 / 0,50] / 38 =$$

$$E(2010) = (0,50) [(0,02) (45) + 1] = \mathbf{0,97}$$

Tabla XVIII.- Evolución del área (expresada en hectáreas) de la superficie ocupada por la cárcava (1966-2010) y % de incremento del área

Cárcava N°	Área (m ²) 1966	Área (m ²) 2010	2010-1966	TCA
5	1189,60	1851,50	661,90	0,56
8	4950,39	2205,00	- 2745,39	- 0,55

TCA=Tasa de Crecimiento Absoluta

Tabla XIX.- Esperado (sin intervención antrópica) calculado con la ecuación predictiva

Cárcava N°	Sup. (ha)	1966	1980	2004	2010
5	4,034	0,12	0,21	0,22	0,24
8	2,436	0,50	0,61	0,85	0,97

Tabla XX - Área real medida con GPS

Cárcava N°	Sup. (ha)	1966	1980	2004	2010
5	4,034	0,12	0,21	0,22	0,19
8	2,436	0,50	0,61	0,85	0,22

IX. CONCLUSIONES

El procedimiento aquí seguido, usando fotografías aéreas de la zona de distintas fechas y SIG para el procesado de dichas fotos, ha demostrado ser un método que permite medir con suficiente precisión el avance de la superficie de las cárcavas.

Se analizó en un período de 45 años (1966-2010), la interrelación, entre factores físicos y morfométricos con el incremento en el área de la superficie de las microcuencas en las que se inscriben diferentes series de cárcavas, en el NE de Canelones, Uruguay.

Del **Factor MORFOMÉTRICO**, se seleccionaron como variables representativas el Factor Forma (F.F.), la Razón de Elongación (R.E.) y el Índice de Circularidad (I.C.).

Los datos obtenidos nos permitieron dar respuesta a la interrogante:

¿Cuáles son las variables representativas de los factores morfométricos y físicos que se relacionan directamente con la extensión en el área de la superficie de las cárcavas?

Del análisis estadístico se desprende que existe correlación débil entre variables (desechándose H_0), por lo que se concluye que, tanto a escala de MICROCUENCAS como a escala de CÁRCAVA, las variables seleccionadas para analizar la incidencia del **Factor MORFOMÉTRICO** en el proceso evolutivo de las cárcavas, no tienen validez interpretativa significativa.

Los valores obtenidos para las variables seleccionadas, representativas del **Factor FÍSICO**, permite concluir que todas las variables, con diferentes grado de intensidad, guardan cierta relación de dependencia con el incremento del área de las superficie de la cárcava. La variable que resultó ser de relevancia significativa al momento de explicar la erodabilidad, fue la **Jerarquización de Evacuación Hídrica** (Strhaler), a escala de microcuencas.

El análisis de las **variables morfométricas** a escala de microcuenca y de cárcava, indica que la correlación es débil, y dentro de las **variables físicas** seleccionadas, los valores obtenidos nos permiten concluir que a escala de microcuenca la **Jerarquía de Evacuación Hídrica (Strhaler)**

resultó de relevancia significativa al momento de explicar la erodabilidad de las unidades hidrogeomórficas estudiadas. El Área y la Pendiente Media guardan relación pero con baja intensidad tanto a nivel de microcuenca como a nivel de cárcava, al igual que el desnivel topográfico a escala de cuenca y de cárcava.

Se concluye que del análisis de las correlaciones de las diferentes variables, con la tasa de extensión de la superficie de las cárcavas, a partir del análisis estadístico realizado, la explicación geomorfológica del proceso erosivo es débil.

Otra de las interrogantes formulada fue:

¿Es posible aplicar un modelo interpretativo del proceso geomorfológico de incremento de la extensión del área de la superficie de las cárcavas de estudio?

A partir de fotografías aéreas y medición en campo con GPS (2010), los valores obtenidos de la superficie de las cárcavas, en cada corte temporal y el cálculo de la tasa de incremento del área, se pudo comprobar la inexistencia de una regularidad en el proceso erosivo que permita calcular un coeficiente constante de incremento del área de la superficie de las mismas.

A partir de la aplicación de la ecuación predictiva formulada por [Pesce \(2009\)](#) se calculó para las cárcavas N° 5 y N° 8 el área que tendrían en el 2010, si no hubieran sido modificadas por factores antrópicos (ver Tablas XVIII, XIX, XX)

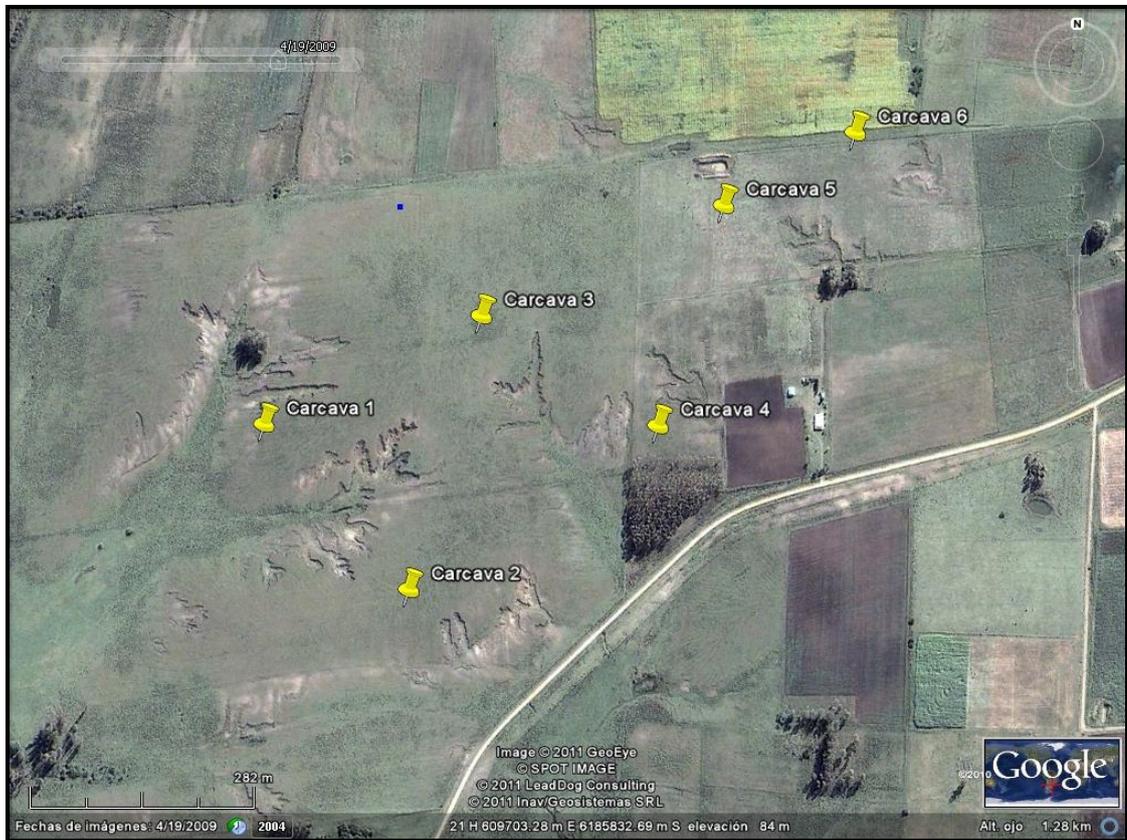
Para dar respuesta a la interrogante:

¿A qué tipología de cárcavas se puede arribar según su dinámica para su clasificación con fines explicativos?

De acuerdo a la clasificación realizada anteriormente, todas las cárcavas en estudio, serian **permanentes**, ya que suponen estructuras que no pueden ser eliminadas mediante procedimientos convencionales de laboreo, serian **continuas** ([Martinez et al, 2009](#)), conforman un sistema de drenaje superficial bien definido, que correspondería a su estado de madurez [Burchard \(1974\)](#), y según [Cespedes com. pers. \(2011\)](#) algunas se encuentran “fossilizadas” con un grado de desarrollo

importante, (según fotografías aéreas de 1966) y su origen sería anterior, probablemente por el uso antrópico intensivo en el NE de Canelones.

Figura 30.- Serie de Cárcavas en Zona Norte



FUENTE: Google Heart 4/19/2009

Según su profundidad (MGAP-DSA-Prenader, 1998), se consideran **profundas** (mayores a 1 metro), y de acuerdo al área de drenaje (o extensión de su cuenca), según Suarez de Castro (1980) serían **medianas** (de 2 a 20 ha) y de acuerdo a su forma en planta, según Peralta (1977) citado por Moder (1983), serían **dendríticas** (ver Fig. 31) ya que están formadas por muchos tributarios en forma ramificada. De acuerdo a la forma de la sección transversal (dada por el ancho y el declive de los taludes), según y Martinez et. al. (2009), tiende a la forma de V, que según estos autores, estaría asociado a tipos de suelo diferenciados (o donde el subsuelo tiene más resistencia que el suelo superficial. Suárez de Castro (1980)

Figura 31.- Foto de **Cárcava N° 1**, inscrita en una cuenca mediana (23 ha); en primer plano, cabecera lateral activa con orientación NW (ver Fig. 22)



En cuanto a la topografía las cárcavas, se desarrollan zona Norte, entre cotas de 70 y 80 m y en zona Sur entre 50 y 60 m y sobre lomadas suaves y pendientes mayores a 2 % en ambas zonas en concordancia con el umbral topográfico de 2,5 % definido por (Sganga, DSA – Prenader).

Figura 32.- Foto de **Cárcava N° 10**, inscrita en una cuenca mediana de 5 ha, en primer plano, cabecera principal, activa y próxima a la divisoria de aguas)



Los intentos para relacionar la formación de cárcavas con las variaciones de los factores externos no ha sido totalmente satisfactorio, a causa de que no todas las cárcavas en una zona parecen responder al mismo tipo de formación (Morgan, 1976).

El crecimiento en todas las cárcavas en estudio fue un proceso permanente (según la medición de la superficie en planta de cada cárcava para cada corte temporal), como consecuencia de la interacción dinámica y compleja del conjunto de factores físicos, morfométricos y antrópicos.

Se concluye que según su dinámica (estado de desarrollo) existen dos tipos de cárcavas:

Tipo 1.- Estable, donde el % de incremento del área erosionada es bajo, menor a 11% (en 45 años) la media del agrupamiento de los resultados, a esta categoría corresponde a 5 microcuencas, correspondientes a las cárcavas N° 3, N° 4, N° 5, N° 6 y N° 9.

Tipo 2.- Activas: en las cuales el proceso erosivo es continuo, con una pérdida de suelo significativa e incrementos del área erosionada superior al 20 % (cárcavas N° 1, N° 2, N° 7 y N° 10).

Figura 33.- Cárcavas N° 1 y N° 2 (Zona Norte)

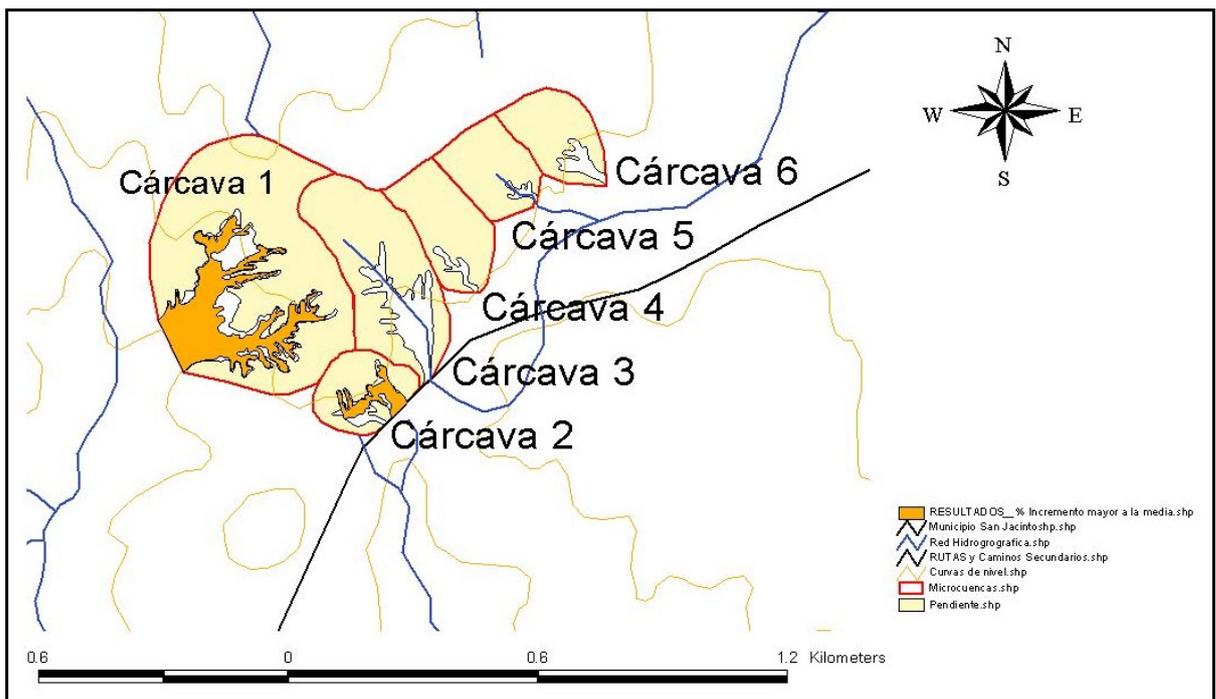
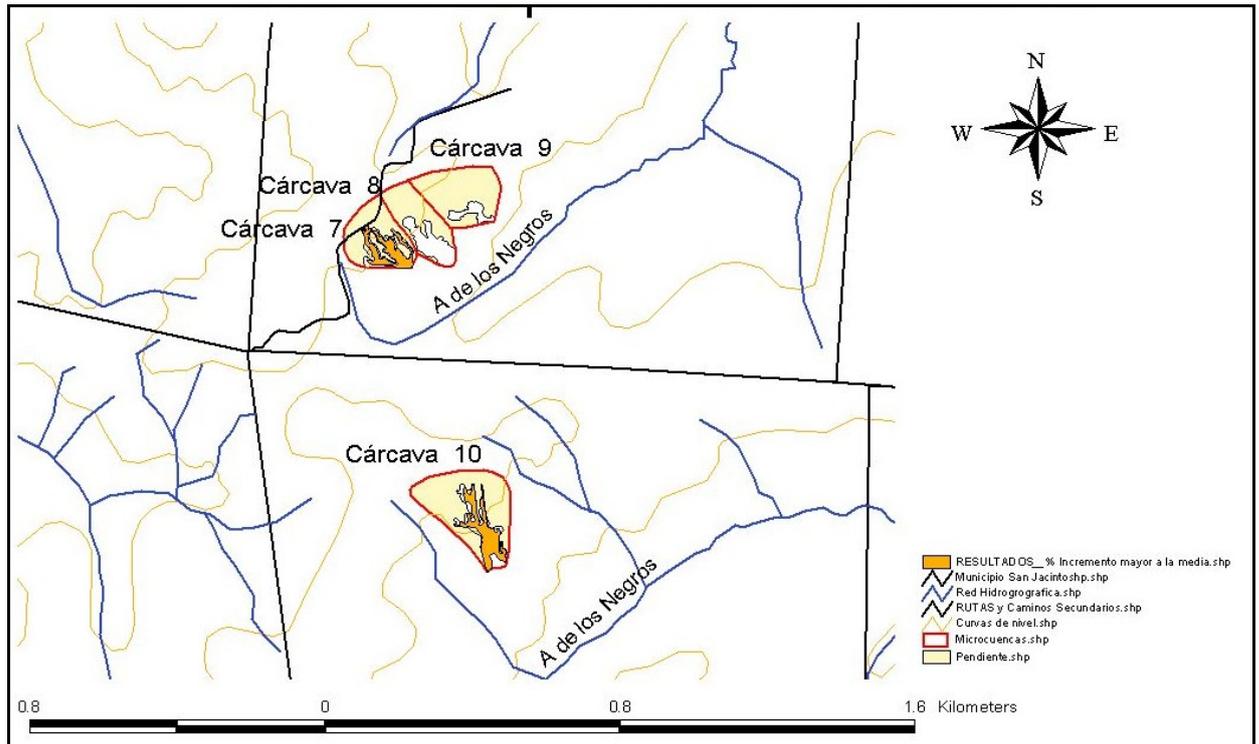


Figura 34.- Cárcavas N° 7 y N° 10 (Zona Sur)



Estos “estadios de desarrollo” al decir de [Ireland, 1939](#) citado por [Bocco, 1991](#), o [Burchard \(1974\)](#), quizás no sean procesos evolutivos continuos, sino que las cárcavas al pasar por sucesivos ciclos de erosión y deposición [Schumm \(1979\)](#), presentan según los cortes temporales analizados un mayor o menor crecimiento. Esto se puede corroborar ya que en una misma cárcava encontramos secciones estables e inestables, mientras una cabecera esta activa con desmoronamiento, otras se encuentran estabilizadas, o una sección se encuentra activa, mientras otra sección más baja esta estabilizada.

Por último para dar respuesta a la interrogante:

¿Existe relación entre la Resistencia a la Penetración (RP) en la microcuenca, la distancia al interfluvio con el avance de las cabeceras el incremento en el área de las cárcavas?

Dos parámetros utilizados frecuentemente para cuantificar la compactación del suelo son la resistencia a la penetración y la densidad aparente. Con relación al primero de ellos, [Yasin et al. \(1993\)](#), establecieron una relación lineal entre el índice de cono y el contenido de humedad.

Según [Threadgill \(1982\)](#), valores de resistencia a la penetración superiores a 1.5 MPa implican reducciones en el crecimiento radicular, en tanto que valores de 2.1, 2.5 MPa actúan como limitante del mismo. En cuanto a la densidad aparente, [Sands et al. \(1979\)](#), encontraron que incrementos de 1.35 a 1.48 Mg m⁻³ produjeron reducciones del 10 al 17% en el rendimiento mientras que valores de 1.6 Mg m⁻³ determinaban una reducción del 50% en el rendimiento de plantaciones de pino en suelos arenosos.

Los valores de resistencia a la penetración de suelo obtenidos en la microcuenca que contiene la cárcava N°1 en estudio no superan 1.5MPa, por lo que se considera que en relación al factor físico no existirían efectos físicos adversos en los suelos tanto para el desarrollo radicular como para la circulación de aire y agua en el perfil.

La resistencia mecánica a la penetración (RMP), es un indicador utilizado para caracterizar los efectos físicos adversos que ofrece el suelo al crecimiento y desarrollo de las raíces. El valor crítico de RMP que impide la elongación radical de los cultivos es muy discutido, variando entre 0,9 y 3 MPa ([Eavis et al., 1969](#)), aunque en general se asume el valor de 2 MPa, dependiendo del penetrómetro utilizado ([Greacen 1986](#), [Topp et al. 1994](#)). [Plá Sentis \(1993\)](#) reportó valores limitantes para el desarrollo de raíces de 0.8 – 5.0 MPa. [Carter \(1988\)](#) mencionó también que valores de 1,5 MPa pueden reducir el crecimiento de las raíces.

A partir del análisis realizado en las cabeceras activas de la cárcava N° 1, se concluye que existe una mayor compactación (resistencia a la penetración) a nivel del interfluvio donde existiría una menor infiltración, favoreciendo el escurrimiento superficial, que a nivel de las cabeceras donde sería mayor la infiltración. Además cuanto mayor es la distancia al interfluvio de acuerdo a los muesteros realizados aumentaría la resistencia a la penetración. Por ultimo según el análisis de RP en planta, a diferentes profundidades parecería que la dirección de avance de las cabeceras buscaría las zonas con mayor RP para crecer.

9.1.- Temas para nuevos trabajos de investigación:

En la literatura se describen, apreciaciones cualitativas de los diferentes factores incidentes (variables condicionantes) que influyen en el comportamiento de una cárcava, producto del conjunto de procesos y sus interrelaciones en un escenario dinámico extremadamente complejo. Por lo que definir los umbrales críticos internos y externos que hacen que se acelere o desaceleren los diferentes procesos que constituyen la erosión en cárcavas, es un tema a investigar. En especial determinar los umbrales críticos de los factores que inciden en su origen y que permitan un manejo precoz procurando prevenir su formación.

- Realizar estudios en cárcavas incipientes o de reciente formación en zonas donde el uso antrópico es intensivo (x Ej. soja).
- Analizar la profundidad en las cabeceras activas de las cárcavas y correlacionarlo con el avance de las mismas.
- Analizar el área de las microcuencas para cada cabecera, ya que es el área de drenaje que le va a permitir seguir creciendo.

9.2.- Recomendaciones:

Prevención + Control y Recuperación

Cada cárcava tiene características genéticas y estructurales propias y debe ser corregida de acuerdo a ellas (Ezechi, 1989). Por otra parte, además los procesos de formación de cárcavas a veces sufren cambios en el tiempo, por lo que las medidas de control deben readecuarse (Bernhard, 1989). La cárcava al originarse en la ruptura del equilibrio metaestable en la cuenca, solo puede recuperarse si se ha apartado poco de la situación original y para ello es necesario aplicar mucha más energía que la requerida para romperlo (Hudson, 1982)

La pérdida masiva de suelo significa el no contar con la estructura fundamental del recurso tierra, que aunque renovable, en el caso de poder recuperarse, que no siempre es posible, significa altísimos costos. Como estrategia es claro que **más vale prevenir que curar**, por lo que en orden de importancia recomendamos diferentes etapas de acción:

- 1) **PREVENCION:** es la más conveniente y significativa, aplicar medidas de conservación de suelos tanto a nivel predial como regional utilizando las cuencas y microcuencas hidrográficas como unidad de análisis y acción para los planes de manejo.
- 2) **CONTROL:** tendiente a minimizar o detener los efectos de la erosión, la efectividad va a depender de su detección temprana y de las medidas que se tomen para eliminar las causas que determinan el fenómeno.
- 3) **RECUPERACION:** tiene como objetivo recuperar la tierra al uso productivo y/o a recobrar las cualidades perdidas.

Para cualquiera de las acciones a tomar, es fundamental, el reconocimiento previo de la situación y el diagnóstico de las causas que posibilitan el fenómeno.

X. BIBLIOGRAFÍA

- ACOSTA, G.; PINEYRUA, J.; PUENTES, R.; VICTORA, C. ,1982. Estimación de la velocidad de avance de cárcavas en algunos suelos del Uruguay bajo diferentes usos de la tierra. Dirección de suelos. MAP.
- ACOSTA, G.; CROSARA A., 1987. Serie: La erosión en cárcavas. Parte I.- La forestación en el control de cárcavas en el Departamento de Maldonado. Boletín Técnico No 12. Dirección de Suelos, DGRNRE- MGAP
- ACHKAR, M. 2002. Evaluación de la distribución espacial de la materia orgánica del horizonte superficial del suelo. En Perfil Ambiental del Uruguay 2002. Nordan. Montevideo.
- ACHKAR, M. et al. 2004. Hacia un Uruguay Sustentable: gestión integrada de cuencas hidrográficas. REDES AT- Uruguay, Montevideo.
- ACHKAR, M. et al. 2004. Diagnóstico socioambiental participativo del Uruguay. Ediciones Tomate Verde, Programa Uruguay Sustentable. REDES ATUruguay.
- ACHKAR, M.; DOMÍNGUEZ, A. Y PESCE, F. 2006. Principales transformaciones territoriales en el Uruguay rural contemporáneo. Pampa. Revista Interuniversitaria de Estudios Territoriales, año 2, N° 2, Santa Fe, Argentina, UNL (pp. 219-242).
- AJAYI, OLAFIN, E. 1989. The dynamics of gully head recession in savanna. Proceeding of the Jerusalem Workshop, 1987. IAHS, Publ. N° 189, 1990: pp135.
- APARICIO, F. 1989. Fundamentos de Hidrología de Superficie. Editorial Limusa. México.
- ARBELETTCHE, P.; Y VEIGA, D. 1984. Evaluación del Programa de la Federación de S.F.R. del Noreste de Canelones. CIESU Inf. 29/85, Piñeiro, Diego E. Redactor del capítulo VII del Informe. ps. 127-156.
- ARBELETTCHE, P. y VEIGA, D. 1985. Síntesis y conclusiones de la evaluación del Programa de a Federación del Noreste de Canelones. CIESU. Serie documentos de trabajo 122/85. Montevideo (Uruguay). 24 p.
- ARULANANDAN, K., LOGANATHAN, P. and KORONE, R.B., 1975. Pore and eroding fluid influences on surface erosion of soil. Journal of Geotechnical Engineering Division, American Society of Civil Engineering, 101: 51-66.
- AVNI, Y., 2004. Gully incision inducing ongoing desertification in the arid regions of the Middle East, examples from the Negev highlands, southern Israel. In: Y. Li, J. Poesen and C. Valentin (Editors), Gully Erosion Under Global Change. Sichuan Science and Technology Press, Chengdu, China, pp. 143-172.
- AVNI, Y., 2005. Gully incision as a key factor in desertification in an arid environment, the Negev highlands, Israel. Catena, 63: 185-220.
- BAND, L. 1993. Extraction of Channel Networks and Topographic Parameters from Digital Elevation Data. Channel Network Hydrology.
- BEER, C.F. and H.P. JOHNSON (1963) Factors in gully growth in the deep loess area of western Iowa. Pp 237-240. Transactions to the ASAE, 1963.

- BLANCO, A. 2003. Evaluación estratégica ambiental y desarrollo metodológico destinado a la gestión sostenible de la fuente de agua potable. Caso de estudio: Cuenca del A° Solís Chico como fuente alternativa para el abastecimiento de agua potable.
- BLONG, R.J., GRAHAM, O.P. and VENESS, J.A., 1982. The role of sidewall processes in gully development: some NSW examples. *Earth Surface Processes and Landforms*, 7: 381-385.
- BOCARDI, L., 2007. et al. *Diagnóstico Ambiental de la Zona Este de la Cuenca del Arroyo Tala, Canelones*. Curso de Diagnóstico Ambiental, Maestría Ciencias Ambientales, Facultad de Ciencias - Universidad de la República Oriental del Uruguay.
- BOCCO, G., 1991. Gully erosion: processes and models. *Progress in Physical Geography*, 15(4): 392-406.
- BOCCO, G.; J. PALACIO and C. R. VALENZUELA 1990. Gully erosion modeling using GIS and geomorfológico knowledge. *ITC Journal*, 9pp.
- BOSSI, J.; NAVARRO, R. 1988. Geología del Uruguay. Tomo II. Universidad de la República.
- BRADFORD, J. M. and R.F. PIEST, 1977. Gully wall stability in loess-derived of alluvium. pp 115-122.. *Soil Sci.Soc.,J. Vol.41*, 1977, USA.
- BRADFORD, J. M. and R.F. PIEST AND R.G. SPROMER, 1978. Failine secuence of gully headwalls in western Iowa. Pp 323-328. *Soil Sci.Soc.,J. Vol.42*, 1978, USA.
- BRADFORD, J. M. and D.A. FORRELL AND W.E. LARSON, 1973. Mathematical Evaluation of Factors Affecting Gully Stability. pp 103-107. *Soil Sci.Soc.Amer.Proc*, Vol.37, 1973, USA.
- BRYAN, R.B. and YAIR, A., 1982. Perspectives on studies of badland geomorphology. In: R.B. Bryan and A. Yair (Editors), *Badland Geomorphology and Piping*. Geo Books, Norwich, pp. 1-12.
- BULL, L.J. and KIRKBY, M.J., 1997. Gully processes and modelling. *Progress in Physical Geography*, 21(3): 354-374.
- BURCHARD, H. 1974. Stages of development of gullies in western USA. *Z. Geomorph – N.F.* pp 260-271, Berlin-Stuttgart.
- BUXEDAS, M. 2007. La coyuntura agropecuaria en perspectiva. In *Anuario 2007 OPYPA*. Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca. Montevideo (Uruguay). pp 11-20.
- CÁMARA, G.; de Medeiros, J.S. 1996. Geoprocessamento para projetos ambientais. São Jose dos Campos. INPE, www.dpi.inpe.br/geopro/papers.html.
- CAORSI, M. L. y J. Ortiz. Pachamama Proyecto de recuperación y manejo sustentable de los recursos naturales de los predios familiares del Noreste de Canelones (Uruguay) Sociedad Fomento Rural 1er Congreso en Co-Innovación de Sistemas Sostenibles de Sustento Rural Pag.81.En:http://www.eulacias.org/materiales/pdfs/materialescongreso/publicacion_congreso/Eesion_4/caorsi_ortiz_sesion_4.pdf
- CASALÍ, J.; GIMÉNEZ, R.; BENNETT, S. 2009. Gully erosion processes: monitoring and modelling. *Earth Surface Processes & Landforms*, Nov2009, Vol. 34 Issue 14, p1839-1840, 2p; DOI: 10.1002/esp.1867

- CASALÍ, J. and GIMÉNEZ, R., 2007. Progress on gully erosion research. Public University of Navarra, Pamplona, 141 pp.
- CASALÍ, J., GIMÉNEZ, R., DE SANTISTEBAN, L.M., CAMPO, M.A., ÁLVAREZ-MOZOS, J., GOÑI, M. and GASTESI, R., 2009. Estado actual del conocimiento sobre la erosión por flujos concentrados en Navarra. Cuadernos de Investigación Geográfica, XXXV(1): 63-86.
- CASALÍ, J., LÓPEZ, J.J. and GIRÁLDEZ, J.V., 1999. Ephemeral gully erosion in southern Navarra (Spain). Catena, 36: 65-84.
- CASANOVAS, M. J. A. 1998. Suelo - Paisaje - Erosión. Erosión por cárcavas y barrancos en el Alt Penedes - Anoia (Cataluña). Un enfoque de estudio mediante tecnologías de la información espacial: Bases de datos, Sistemas de Información Geográfica. Tesis doctoral, Universidad de Lleida, Department de Medi Ambient i Ciències del Sol, setiembre de 1998.
- CAYSSIALS, R., LIESEGANG, J. Y PIÑEYRÚA, J. 1978. Panorama de la erosión y conservación de los suelos del Uruguay. Boletín Técnico N° 4 - DSA/MGAP.
- CAYSSIALS, R.; Long, M; Pesce, F. 1995. Análisis morfométrico secuencial del proceso de erosión de suelos en la cuenca del A° Tala. Proyecto CSIC 1993-1995. Departamento de Geografía. Facultad de Ciencias, UdelaR.
- CAYSSIALS, R. 2001. Las micro-cuencas como unidad de trabajo. Programa de Manejo de Recursos Naturales y Desarrollo del Riego (PRENADER) - MGAP. En: La República, Miércoles, 11 de julio, 2001 - AÑO 11 - Nro.527
- COUSILLAS, M.; EVIA, G.; GUDYNAS; E. 2000. Comentarios de las normas por tema. En Normativa ambiental para la agropecuaria, guía para la agropecuaria introductoria. CLAES-IFCA (eds).
- CHIAPPE, M.; GRAT, E.; CARRAU, A. , 2003. La dimensión ambiental de la producción agropecuaria, Una perspectiva desde los actores.
- CHORLEY, R. 1971. Introduction to Geographical Hydrology. Editorial Methuen & Co. Londres.
- CNFR http://www.cnfr.org.uy/uploads/files/Documento_Cosanec_10abr2010.pdf
- DAMIANI, O. 1990. Desarrollo forestal y medio ambiente en Uruguay. 4. Un estudio de caso en el Noreste de Canelones. CIEDUR. Serie Investigaciones N° 76. Montevideo (Uruguay). 14 p.
- DIEA, Dirección de Estadísticas Agropecuarias 2000. Censo General Agropecuario 2000.
- DNM (Dirección Nacional de Meteorología), Dirección de Climatología y Documentación.
- DE LUNA, E., LAGUNA, A.M., POESEN, J. and GIRÁLDEZ, J.V., 2004. Evolución de un sistema de cárcavas activas en el sureste español. Ingeniería del agua, 11: 65-73.
- DODGE, R.E., 1902. Arroyo formation. Science, 15: 746
- DOUGLAS, I. and PIETRONIRO, A., 2003. Predicting road erosion rates in selectively logged tropical rain forests. In: D. de Boer, W. Froehlich and T. Mizuyama (Editors), Proceedings of the International Symposium Erosion prediction in ungauged basins, integrating methods and techniques. IAHS Press, Sapporo, Japan.

- DUQUE, J. F. M. 2007. Erosión hídrica en cárcavas y barrancos de la provincia de Segovia, España. En: www.aulados.net Geología y Yacimientos Minerales
- DURÁN, A. 1991. Los suelos del Uruguay. 2ª. ed. Montevideo, Hemisferio Sur. 398p.
- DURÁN, A; CALIFRA, A Y MOLFINO, J. H. 1999 Suelos del Uruguay según Soli Taxonomy.
- EVANS, R., 1993. Extent, frequency and rates of rilling of arable land in localities in England and Wales. In: S. Wicherek (Editor), *Farm Land Erosion in Temperate Plains Environment and Hills*. Elsevier, Amsterdam, pp. 177-190.
- FAO, 1965. Soil erosion by water. Some measures for its control on cultivated lands., Rome
- FAO, 1967. La erosión del suelo por el agua. Cuadernos de fomento agropecuario. N° 81 Roma. 207 p.
- FAULKNER, H., 1995. Gully erosion associated with the expansion of untterraced almond cultivation in the coastal Sierra de Lújar, S. Spain. *Land Degradation & Rehabilitation*, 9: 179-200.
- FAULKNER, H., SPIVEY, D. and ALEXANDER, R., 2000. The role of some site geochemical processes in the development and stabilisation of three badland sites in Almeria, Southern Spain. *Geomorphology*, 35(1-2): 87-99.
- FAULKNER, H.P., ALEXANDER, R. and ZUKOWSKYJ, P., 2008. Slope-channel coupling between pipes, gullies and tributary channels in the Mocatán catchment badlands, Southeast Spain. *Earth Surface Processes and Landforms*, 33(8): 1242-1260
- GALLART, M. A. 2002. Veinte años de educación y trabajo: la investigación de la formación y la formación de una investigadora. Montevideo: Cinterfor, 386 p.
- GALLART, F., 2009. Algunos criterios topográficos para identificar el origen antrópico de cárcavas. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, XXXV(2): 215-222.
- GARCÉS, A. 2003. Informe de la socioeconomía del interior del país. Departamento de Canelones, 16 diciembre 2003.
- GARCÍA-HIDALGO, J.F. et. al. 2006. Morfología, procesos erosivos y evolución reciente en una cárcava cuaternaria: El barranco Haza de la Viña, Uceda (Guadalajara, España). *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural*, 101 (1-4): 41-50.
- GARCÍA, F. 2010. Decano de la Facultad de Agronomía, UdelaR, en: Entrevista en Diario El Observador, 12 noviembre 2010.
- GARCÍA PRÉCHAC, F. 2009. La erosión en la agricultura de Uruguay. In *Simposio Efectos de la agricultura, la lechería y la ganadería en el recurso natural suelo: impactos y propuestas*. 20, 21/8/2009. Montevideo. Serie Actividades de Difusión N° 87. INIA La Estanzuela. (Uruguay). pp 29-30.
- GONZÁLEZ IDIARTE, H. y VICTORA, C. 2009. Campaña de uso y manejo responsable y sostenible del suelo. In *Simposio Efectos de la agricultura, la lechería y la ganadería en el recurso natural suelo: impactos y propuestas*. 20 y 21 de agosto de 2009. Montevideo. Serie Actividades de Difusión N° 587. INIA La Estanzuela. Montevideo Uruguay). pp 77-80.
- GARCÍA JIMÉNEZ, E; GIL, J; RODRÍGUEZ, G. (2000). Análisis Factorial. Cuadernos de Estadística. Ed. La Muralla. Madrid.

- GÓMEZ, B, BANBURY, K., MARDEN, M., TRUSTRUM, N.A, PEACKOCK, D.H, HOSKIN, PJ. 2003. Gully erosion and sediment production, The Weraroa Stream New Zealand Water Resources Research, 39.
- GONZÁLEZ DE MATAUCO, A. (2004). Análisis morfométrico de la cuenca y de la red de drenaje del Río Zedirra y afluentes. Boletín de la Universidad de Málaga, España.
- GOSO, E.; LEDESMA J. J. Geología de Depósitos Cuaternarios. En: <http://www.fing.edu.uy/imfia/proyin/raigon/capitulo2.html>.
- GUTIÉRREZ, G. A. 2011. Procesos, factores y consecuencias de la erosión por cárcavas; trabajos en la Península Ibérica. Boletín Asociación de Geógrafos Españoles N.º 55 2011, págs. 59-80.
- HARVEY, A., 1982. The role of piping in the development of badlands and gully systems in south-east Spain. *Badland geomorphology and piping*: 317-335
- HEEDE, B.H., 1967. The fusion of discontinuous gullies: A case study. *Bulletin of the International Association of Scientific Hydrology*, 12: 42-50.
- HEEDE, B.H., 1982. Gully control: determining treatment priorities for gullies in a network. *Environmental Management*, 6(5): 441-451.
- HUANG, H. Q., WARNER, R. F., 1995. The multivariate controls of hydraulic geometry: a causal investigation in terms of boundary shear distribution. *Earth Surface Processes and Landforms*, 20:115-130.
- HUNTINGTON, E., 1914. *The Climatic Factor as Illustrated in Arid America*. Carnegie Institute of Washington Publication 192, Washington, DC, 341 pp.
- HUDSON, N. 1982. *Technology & Engineering*, 335 páginas, Capítulo 12 Erosión por cárcavas.
- IICA/IMC, 2006. Marco Conceptual y metodología de Proyectos de Desarrollo Rural con enfoque territorial para el departamento de Canelones, Conclusiones del Taller 23 y 24 de Febrero 2006, IMC - IICA,. En URL: <http://www.iica.org.uy/online>
- IICA. 2007. Plan de desarrollo del noreste de Canelones: Sistematización de una experiencia de desarrollo rural sostenible con enfoque territorial en Uruguay. Montevideo (Uruguay). 70p.
- IMESON, A.C. and KWAAD, F.J.P.M., 1980. Gully types and gully prediction. *Geografisch Tijdschrift*, 14(5): 430-441.
- INE. Encuesta ampliada Nacional de hogares 2006. En: www.ine.gub.uy
- INIA/CNFR. 2005. Contribución de los sistemas mixtos intensivos al desarrollo sostenible del Noreste de Canelones. Seminario-Taller. Mayo de 2005. Canelones (Uruguay). 10 p. Versión electrónica. <http://www.geocities.com/cnfruruguay/tallerinia.htm>.
- IPRU. 1982. Programa de desarrollo rural para la Federación de Sociedades de Fomento del noreste de Canelones. Montevideo (Uruguay). 58 p.
- IRELAND, H.A., SHARPE, C.F.S. and EARGLE, D.H., 1939. Principles of gully erosion in the piedmont of south Carolina. *Technical Bulletin of U.S. Dept. of Agriculture*, 63: 143.
- IROUME, A. GOYOSO, J. HERNANDEZ, M. 1994. Caracterización de cárcavas en las regiones VIII y IX de Chile. *Bosque* 2 15 (2) 65-75

- ITURBURU, M., PÉREZ A., RISSO C., 1999. Mecanización de cultivos hortícolas, siembra directa de cebolla. Tesis (Ing. Agrónomo) Facultad de Agronomía, UdelaR.
- ITURBURU, M. 2005. Cambio Climático en la Cuenca del Plata, Maestría Ciencias Ambientales, Facultad de Ciencias, UdelaR
- JAUQUE, E. MANZANARES, P. 2005. Evaluación de la Erodabilidad hídrica en la cuenca hidrográfica de la laguna Quiñenco, VII Región del Biobío, Chile. *Revista Geografía, Norte Grande*, julio, número 033 Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile pp. 103-112.
- JARDI, M. (1985). Forma de una cuenca de drenaje. Análisis de variables morfométricas que las definen. *Revista Geografía, Monte Grande*, n° 19. Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago Pp 41- 68.
- JONES, J. A. A., 1981. The nature of soil piping: a review of research, Research Monograph 3. Geo Books, Norwich; British Geomorphological Research Group, 301 pp.
- KNAPEN, A., POESEN, J., GOVERS, G., GYSSELS, G. and NACHTERGAELE, J., 2007. Resistance of soils to concentrated flow erosion: A review. *Earth-Sciences Reviews*, 80: 75-109.
- KIRKBY, M. J.; BRACKEN, L. J. 2009. Gully processes and gully dynamics. *Earth Surface Processes & Landforms*, Nov 2009, Vol. 34 Issue 14, p1841-1851, 11p; DOI: 10.1002/esp.1866
- Ley 15.239 de diciembre de 1989 Ley de Suelos y Agua. Marco legal para el uso, manejo y conservación de suelos y aguas con fines agropecuarios y Reglamentación Dirección General de Recursos Naturales Renovables, Dirección de Suelos y Aguas, MGAP, Octubre 1991.
- LEOPOLD, L. B., 1951. Rainfall frequency: An aspect of climatic variation. *Transactions of the American Geophysical Union*, 32: 347-357.
- LEOPOLD, L. B., 1978. El asunto del Arroyo. In: C. Emblenton (Editor), *Geomorphology*. Oxford University Press, London, pp. 25-49.
- LEOPOLD, L.B., EMMET, W.W. and MYRICK, R.M., 1966. Channel hillslope processes in a semiarid area, New Mexico. *United States Geological Survey Professional Paper*, 282-A: 37 pag.
- LEOPOLD, L.B. and MILLER, J.P., 1956. Ephemeral streams: hydraulic factors and their relation to the drainage net. *U.S. Geological Survey*, 282A: 37.
- LEOPOLD, L. B., WOLMAN, M.G. and MILLER, J.P., 1964. *Fluvial processes in geomorphology*.
- LI, Y., POESEN, J. and VALENTIN, C., 2004. Gully erosion under global change. *Sichuan Science Technology Press*, Chengu, China, 354 pp.
- LÓPEZ-VICENTE, M. and NAVAS, A., 2009. Escorrentía y pérdida de suelo en cárcavas: modelización en un agrosistema del Pirineo oscense. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, XXXV(2): 239-262.
- MARTÍNEZ-CASASNOVAS, J.A., 2003. A spatial information technology approach for the mapping and quantification of gully erosion. *Catena*, 50: 293-308.
- MARTÍNEZ-CASASNOVAS, J.A., ANTÓN-FERNÁNDEZ, C. and RAMOS, M.C., 2003. Sediment production in large gullies of the Mediterranean area (NE Spain) from high resolution digital elevation models and geographical information systems analysis. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28(5): 443-446.

- MARTÍNEZ-CASASNOVAS, J.A. and CONCEPCIÓN RAMOS, M., 2009. Erosión por cárcavas y barrancos en el área de viña del Alt Penedès-Anoia (NE España). Cuadernos de Investigación Geográfica, XXXV(2): 223-238.
- MARTÍNEZ-CASASNOVAS, J.A., RAMOS, M.C. and POESEN, J., 2003. Assessment of sidewall erosion in large gullies using multi-temporal DEMs and logistic regression analysis. *Geomorphology*, 58: 305-321.
- MARTÍNEZ M. R. et al. 2009. Control de Cárcavas, Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Subsecretaría de Desarrollo Rural, Dirección General de Apoyos para el Desarrollo Rural. Especialidad de Hidrociencias del Colegio de Postgraduados, Montecillos, Estado de México. 2009
- MENÉNDEZ-DUARTE, R. et. al 2007. Incised channels and *gully* erosion in Northern Iberian Peninsula: Controls and geomorphic setting.. *CATENA*, Oct2007, Vol. 71 Issue 2, p267-278, 12p; DOI: 10.1016/j.catena.2007.01.002.
- MEZZOTTONI, R. 1980. Erosión, control y recuperación de zanjas. Primeras jornadas de conservación y manejo de suelos para productores. Quebracho, Paysandú. Dirección de suelos MAP. 5pp.
- MGAP-DSA-PRENADER 1998. Carta Nacional de Erosión Antrópica. Atlas.
- MGAP-DSA 1985. Erosión Actual de Canelones-Montevideo. Carta de Divulgación. MGAP
- MGAP, 1982. Carta de Reconocimiento de suelos de la República Oriental del Uruguay a escala 1:100.000. Departamento de Canelones y Montevideo. Dirección de Suelos 19pp.
- MGAP, 1982. El relevamiento de reconocimiento de suelos de la República Oriental del Uruguay a escala 1:100.000. Metodología y pautas. Dirección de Suelos. Montevideo, Uruguay 27pp.
- MGAP, 1976. Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay. Tomo I: Clasificación de Suelos el Uruguay. Dirección de Suelos y fertilizantes. Montevideo, Uruguay 83pp.
- M.G.A.P. 1985. Erosión actual en los departamentos de Canelones y Montevideo. División Suelos y Aguas. Montevideo (Uruguay). 44 p.
- MGAP, 1994. Grupo de suelos Índices de Productividad. Grupos C.O.N.E.A.T. Dirección General de Recursos Naturales Renovables (RENARE) Montevideo, Uruguay 182pp.
- MGAP-DSA, 1999. Intensidad del proceso erosivo escala 1:500.000. Fuente: Carta de erosión antrópica. Dirección General de Recursos Naturales Renovables. MGAP (Uruguay).
- M.G.A.P. 2001. Censo General Agropecuario 2000. Dirección de Estadísticas Agropecuarias. Resultados definitivos. Volumen 1. Montevideo (Uruguay). 44 p.
- MGAP, 2005. Nuestro suelo Patrimonio Nacional. Dirección General de Recursos Naturales Renovables, División Suelos y Aguas.
- MIETH, A., BORK, H.R., 2005. History, origin and extent of soil erosion on Easter Island (Rapa Nui). *Catena*, 63,244-260.
- MILLER, C. R., WOODBURN, R. and TURNER, H.R., 1962. Upland gully sediment production. IASH Publication, 59: 83-104.

- MOORE, I.D. and BURCH, G.J., 1986. Modeling erosion and deposition: topographic effects. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 29(6): 1624-1640.
- MOORE, I.D., BURCH, G.J. and MACKENZIE, D.H., 1988. Topographic effects on the distribution of surface soil water and the location of ephemeral gullies. *Transactions of the ASAE*, 32(4): 1098-1107.
- MORGAN, R.P.C., 1997. *Erosión del suelo y conservación*. Mundi-Prensa, Madrid, 343 pp.
- MORON, I. 1960. *Contraresto de erosión en cárcavas*. Dirección de la Escuela de Silvicultura. Maldonado
- NAGY, G., M. BIDEGAIN, M. CAFFERA, F. BLIXEN, G. FERRARI, J. LAGOMARSINO, W. NORBIS, CH. LÓPEZ, A. PONCE, M. C. PRESENTADO, V.PSHENNIKOV, K. SANS, G. SENCION, D. SEVEROV 2007. "Climate and Water Quality in the Estuarine and Coastal Fisheries of the Rio de la Plata", en N. Leary, J. Adejuwon, V. Barros, I. Burton, J. Kulkarni y R. Lasco (eds.): *Climate Change and Vulnerability*, London, Earthscan.
- NYSSSEN, J. POESEN, J., MOEYERSONS, J., MITIKU, H., LANG A., 2004. Human impact on the environment in the Ethiopian and Eritrean highlands: a state of the art. *Earth Science Reviews*, 64, 273-320.
- OEA, BID, 1989. *Estudio Ambiental Nacional (EAN) del Uruguay, Resumen Informe Final*, En: <http://www.oas.org/dsd/publications/Unit/oea10s/ch006.htm>
- OLDEMAN, L. R. 1994. The global extent of land degradation. En: D.J. Greenland e I. szabolcs (eds). *Land Resilience and sustainable Land use*. CABI, Wallingford, pp. 99-118.
- OOSTWOUD WIJDENES, D. and BRYAN, R., 1994. The significance of gully headcuts as a source of sediment on low-angle slopes at Baringo, Kenya, and initial control measures. *Advances in Geocology*, 27: 205-231.
- OOSTWOUD WIJDENES, D., POESEN, J., VANDEKERCKHOVE, L. and GHESQUIERE, M., 2000. Spatial distribution of gully head activity and sediment supply along an ephemeral channel in a Mediterranean environment. *Catena*, 39: 147-167.
- OSTERKAMP, W.R., 2008. *Annotated Definitions of Selected Geomorphic Terms and Related Terms of Hydrology, Sedimentology, Soil Science and Ecology*, USGS Open file Report 2008-1217, Reston, Virginia.
- OLIVERA M.C.1989. *Como influyen los factores socioeconomicos en la erosión de Canelones*. Tesis de grado. Facultad de Agonomía, UdelaR Uruguay.
- PANARIO D. 1979. Aspectos geomorfológicos vinculados al fenómeno erosivo 1^{er} Seminario Nacional sobre Conservación de Recursos Naturales Renovables, Montevideo 1979, 11p.
- PARDO, GUSTAVO, *El Noreste de Canelones y su problemática*, Banco de Seguros del Estado 250-255pp. En: <http://www.bse.com.uy/almanaque/Almanaque%201988/pdf/0%20%20050.pdf>
- PATTON, P.C. AND SCHUMM, S.A.,1975. Gully erosion, northwestern Colorado: a threshold phenomenon. *Geology*, 3: 88-90
- PESCE, F. 2010. *Análisis morfométrico secuencial del proceso de erosión en las cárcavas del Parque Lacustre Garzón* Departamento de Rocha, Uruguay, Tesis de Maestria Ciencias Ambientales, Facultad de Ciencias, Universidad de la República

- PESCE, F. Aportes de la Hidrología Morfométrica a la Ecología Fluvial. En:
<http://tecrenat.fcien.edu.uy/Cuencas/Gestion%20Integrada%20de%20Cuencas/Aportes%20de%20la%20Hidrologia%20a%20la%20Ecologia%20Fluvial.pdf>
- PIEST, R.F.; ZIEMNICKI S. 1979. Comparative erosion rates of loess soil in Poland and Iowa. pp 822-833. Transaction of the ASAE, 1979, USA.
- PIEST, R. F.; J.M. BRADFORD and WYATT G. M. 1975. Soil erosion an sediment transport from gullies pp 65-79. Journal of the Hydraulics division, 1975. ASCE.
- PINEIRO, D. E. 1985. Formas de Resistencia de la Agricultura Familiar. El caso del Noreste de Canelones. CIESU. Ediciones de la Banda Oriental. Colección Estudios sobre la Sociedad Uruguaya No. 6. Montevideo, 1985. 177 ps.
- PINEIRO, D. E. 1984. ¿Qué haremos con la Agricultura Familiar? Reflexiones en torno al caso del Noreste de Canelones. In: CIPFE / CIEDUR / CCU / CINVE/. Ambiente y Desarrollo Ediciones de la Banda Oriental. Temas del Siglo: 66-86.
- PINEIRO, D. E., 1981-82. Investigación sobre los pequeños productores del NE del departamento de Canelones y las formas de adaptación y resistencia a la política económica neo-liberal. CIESU-Centro Internacional de Investigaciones del Canadá.
- PINEIRO, D. E.; Diego, E.; Sosa, S. 1980. Estudio de Factibilidad para el control de la erosión en el N.E. de Canelones. CIESU, DT 21/80, 9 ps.
- PINEIRO, D. E.; Diego, E.; Sosa, S.,1979. Estudio de Factibilidad para el control de la erosión en el N.E. de Canelones. CIESU, DT N° 25, Montevideo. Dic. 1975, 154 págs.
- PINEIRO, D. E. 1978-79. Responsable del estudio sobre el área noreste del departamento de Canelones solicitado por la Comisión Nacional de Fomento Rural. CIESU. IPRU. Fundación Interamericana. CIID.
- POESEN, J., DE LUNA, E., FRANCA, A., NACHTERGAELE, J. and GOVERS, G., 1999. Concentrated flow erosion rates as affected by rock fragment cover and initial soil moisture content. Catena, 36: 315-329.
- POESEN, J. and HOOKE, J. M., 1997. Erosion, flooding and channel management in Mediterranean environments of southern Europe. Progress in Physical Geography, 21(2): 157-199.
- POESEN, J., NACHTERGAELE, J., VERSTRAETEN, G. and VALENTIN, C., 2003. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. Catena, 50: 91-133.
- POESEN, J., VANDAELE, K. and VAN WESEMAEL, B., 1996. Contribution of gully erosion to sediment production on cultivated lands and rangelands. IAHS, 236: 251-266.
- PONCE DE LEON, D. (2007) En: <http://www.larepublica.com.uy/economia/270476-procuran-salida-productiva-para-noreste-de-canelones> Domingo, 12 agosto, 2007,AÑO 11 - Nro.2637
- PODWOJEWSKI,P., POULENARD, J.,ZAMBRANA, T., HOFSTEDE, R., 2002. Overgrazing effects on vegetation cover and properties of volcanic ash soil in the paramo of Llangahua and La Esperanza (Tungurahua, Ecuador). Soil Use and Management, 18,45-55.
- PRENADER Programa de Manejo de Recursos Naturales y Desarrollo de Riego. Seguimiento de la evolución de cárcavas y su control. Consultoria realizada en el período 1994-2000 la cual llevo adelante 5 proyectos de investigación en conservación de suelos. www.mgap.gub.uy

- REID, L. M., 1989. Channel initiation by surface runoff in a grassland catchment, PhD thesis, University of Washington, Washington, 135 pp.
- RIELY S. J. and D.K. WILLIAMS (1991) Thresholds of gullying, arhem lands, Northern territory, Australia. *Malaysian Journal of Tropical Geography*. 1991, 22 (2): pp133-143.
- ROLOFF, G. J.M. BRADFORD and C.L. SCRIVNER (1981) Gully development in the deep loess hills region of Central Missouri. Pp 119-123. *Soli Sci.Soc.Am.J.*, vol.45, 1981.
- RUSSI, C. A. 2009. Propuesta de desarrollo para la zona de Los Arenales (NE de Canelones) con énfasis en actividades productivas agropecuarias sustentables. Tesis de Magíster en Desarrollo Rural Sustentable. Facultad de Agronomía, UdelaR, 2009.
- SANTIAGO, E. 2007. Generalidades sobre la erosión en cárcavas. En: Publicación de la Universidad de Oriente. Ciudad Bolívar. Venezuela.
- SCHUMM, S.A.,1971. Fluvial geomorphology: the historical perspective. In: H.W. Shen (Editor), *River mechanics*. CO: H.W. Shen, Fort Collins, pp. 4-1-4-30.
- SEGINER, I. 1966. Gully development an sediment yield. Pp236-253. *Journal of Hidrology*, 1966. North Holland Publ. Co, Amsterdam.
- SENCIALES, J. 1998. El análisis morfológico de las cuencas fluviales aplicado al estudio hidrográfico. En *Norbe*, N° X, pp 155- 183.
- SENCIALES, J. 1999. Redes fluviales. Metodología de análisis. Serie Estudios y Ensayos. Universidad de Málaga. 337 páginas.
- SGANGA, J.C.,1979. La forestación en la conservación de suelos. Dirección de Suelos MAP, 32 pp.
- SGANGA, J. C. 1999. Contribución al conocimiento de las características y génesis del proceso erosivo en cárcavas en el Uruguay. Estrategias para su control. MGAP. DGRNR. Montevideo, Uruguay.
- SGANGA, J. C. 2000. Proyecto n° 41: "Evaluación de erosión en cárcavas y métodos de control". En: <http://www.mgap.gub.uy/renare/SuelosyAguas/UsoyConservacion/Divulgaci%C3%B3n/Resumen%2041-2000.pdf>
- SGM, Servicio Geográfico Militar 1971. Carta Geográfica del Uruguay a Escala 1/500.000.
- SGM, Servicio Geográfico Militar 1995. Catálogo cartográfico. Diseño Ejecución e Impresión: Servicio Geográfico Militar.
- SHENG, T. C. 1992. Manual de campo para la ordenación de cuencas hidrográficas. Guía FAO Conservación 13/6. 185 páginas.
- SHERARD, J. L., RYKER, N.L. and DECKER, R.S., 1972. Piping in earth dams of dispersive clay, Special Conference on the Performance of Earth and Earth Supported Structures. ASCE, pp. 150-161.
- SIMON, A., CURINI, A., DARBY, S.E. and LANGENDOEN, E.J., 2000. Bank and near-bank processes in an incised channel. *Geomorphology*, 35: 193-217

- SING, S. y SHEO, P. 1987. Rill and gully erosion in the subhumeid tropical riverine environment of Teonthar Tahsil, Madhya Pradesh, India. *Geogr. Ann.* 69A (1): 277-236.
- SOMS, 2006. Regularities of gully erosion network development and spatial distribution in south-eastern Latvia. *Baltica* Volume 19 Number 2 December 2006: 72-79
- SPOTURNO, J.; OYHANTCABAL, P.; GOSO, C.; AUBET, N.; CAZAUX, S.; Y HUELMO, S. 2004. *Memória explicativa, Carta Geológica y de Recursos Minerales del Departamento de Montevideo a Escala 150/000 Proyecto CONICYT 6019, Fondo Clemente Estable.*
- SUÁREZ DE CASTRO 1980. *Conservación de suelos. IICA, Costa Rica.*
- TAKAHASHI, G; TAKASHI, G; KAICHIRO, S. (2008). Hyphoreic flor as a potencial geomorphic agent in the evolution of channel morphology in a bed river. *Catena*, Volume 73, Issue 1, 15th march. Pp. 98- 106.
- THOMAS, J. T., IVERSON, N. R., BURKART, M.R. and KRAMER, L.A., 2004. Long term growth of a valley-bottom gully, wester Iowa. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29: 995-1009
- THOMPSON, J. R. 1964. Quantitative effect of watershed variables on the rate of gully – head advancement. Pp 54-55. *Transactions of the ASAE*, 1963.
- VALENTIN, C., D'HERBÈS, J.M. AND POESEN, J., 1999. Soil and water components of vegetation patterning. *Catena*, 37: 1-24.
- VALENTIN, C., POESEN, J. and YONG, L., 2005. Gully erosion: Impacts, factors and control. *Catena*, 63: 132-153.
- VIERS, G. 1983. *Tratado de Geomorfología. Ed. OIKOS TAU, Barcelona.*
- VIGLIZZO, E.; DE MORAES G.; DANTAS, M.; PUIGNAU, J. P.; Programa Cooperativo para el desarrollo tecnológico agropecuario del Cono Sur (PROCISUR), Subprograma Recursos Naturales y Sostenibilidad Agrícola, Documento Marco IICA, 1995.
- VITTORINI, S., 1972. The effect of soil erosion in an experimental station in the Pliocene clay of the Val d'Era(Tuscany) and its influence on the evolution of the slopes. *Acta Geographica Debrecina*,10:71-81.
- WARD, R; ROBINSON, M. 2000. *Principles of hydrology. Mc Graw- Hill, England. 360pág.*
- WILSON, G.; CULLUM, R.; ROMKENS, M. 2008. Ephemeral gully erosion by preferential flow through a discontinuous soil pipe. En *CATENA*, Volúmen 73, Issue 1, 15th march. Pp. 98- 106
- ZINCK, J.A.; J. LOPEZ, G. I.; METTERNICHT, D. P.; SHRESTHA, Y VAZQUEZ SELEM, L. 2001. Mapping and modelling mass movements and gullies in mountainous areas using remote sensing and GIS techniques. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, JAG 3 (2001-1): 43-53.
- ZINCK, A. 2005. Suelos, información y sociedad. *Gaceta ecológica número 76, Instituto Nacional de Ecología, México pag 7-22.*
- ZUCCA, C., CANNU, A. and DELLA PERRUTA, R., 2006. Effects of land use and landscape on spatial distribution and morphological features of gullies in an agropastoral area in Sardinia (Italy). *Catena*, 68: 87-95.

This document was created with Win2PDF available at <http://www.win2pdf.com>.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.
This page will not be added after purchasing Win2PDF.