



**ANÁLISIS CUANTITATIVO DEL PROCESO DE EROSIÓN
EN LAS CÁRCAVAS DEL PARQUE LACUSTRE GARZÓN**

DEPARTAMENTO DE ROCHA, URUGUAY

MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES

FACULTAD DE CIENCIAS

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

Lic. Fernando Pesce

2009

Presentado por:

FERNANDO PESCE GUARNASCHELLI

PARA OBTENER EL GRADO DE

MAGISTER EN CIENCIAS AMBIENTALES

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

**Análisis cuantitativo del proceso de erosión en las cárcavas
del Parque Lacustre Garzón- Rocha, Uruguay**

Orientador: Profesor Titular Daniel Panario.

Co- orientador: Dr. Marcel Achkar.

2009

<u>RESUMEN</u>	; Error! Marcador no definido.
<u>ABSTRACT</u>	; Error! Marcador no definido.
<u>I. INTRODUCCIÓN</u>	; Error! Marcador no definido.
<u>II. JUSTIFICACIÓN</u>	; Error! Marcador no definido.
<u>III. ASPECTOS TEÓRICOS</u>	; Error! Marcador no definido.
<u>III.1- ORIGEN Y DINÁMICA DE LAS CÁRCAVAS</u>	; Error! Marcador no definido.
<u>III.2- PROPIEDADES MORFOMÉTRICAS DE LAS MICROCUENCAS</u>	; Error! Marcador no definido.
<u>III.3- PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS MICROCUENCAS</u>	19
<u>III.4- FACTORES EROSIVOS ANTRÓPICOS</u>	; Error! Marcador no definido.4
<u>III.5- SÍNTESIS DE LOS ASPECTOS TEÓRICOS</u>	26
<u>IV. INTERROGANTES- OBJETIVOS- HIPÓTESIS DE TRABAJO</u>	27
IV.1- OBJETIVOS.....	27
IV.2 - INTERROGANTES.....	28
IV.3- HIPÓTESIS.....	29
<u>V. MATERIALES Y MÉTODOS. DESCRIPCIÓN DE ACTIVIDADES</u>	; Error! Marcador no definido.0
<u>V.1- MATERIALES</u>	; Error! Marcador no definido.0
<u>V.2- MÉTODOS</u>	; Error! Marcador no definido.2
<u>VI. CARACTERIZACIÓN GEOGRÁFICA DEL ÁREA</u>	; Error! Marcador no definido.8
<u>VI.1- LOCALIZACIÓN Y EXTENSIÓN</u>	; Error! Marcador no definido.8
<u>VI.2- CARACTERIZACIÓN FÍSICO- AMBIENTAL</u>	39
<u>VI.3- REGIONALIZACIÓN FÍSICA DEL ÁREA DE ESTUDIO</u>	; Error! Marcador no definido.
<u>VI.4- CARACTERIZACIÓN SOCIO- ECONÓMICA</u>	; Error! Marcador no definido.
<u>VI.5- URBANIZACIÓN Y ACTIVIDAD TURÍSTICA</u> ...	; Error! Marcador no definido.

<u>VI.6- CONSTRUCCIÓN E IMPACTOS DE LA RUTA NACIONAL N° 10</u>	
.....	¡Error! Marcador no definido.
<u>VI.7- EXPANSIÓN DE LOS CULTIVOS FORESTALES.....</u>	¡Error! Marcador no definido.
<u>VI.8- SÍNTESIS DE LA CARACTERIZACIÓN AMBIENTAL.....</u>	¡Error! Marcador no definido.

VII. DESCRIPCIÓN CUANTITATIVA DEL INCREMENTO EN EL ÁREA DE LA SUPERFICIE DE LAS CÁRCAVAS A ESCALA DE MICROCUENCAS 57

<u>VII.1- INTRODUCCIÓN.....</u>	57
<u>VII. 2- MORFOMETRÍA DESCRIPTIVA.....</u>	61
<u>VII. 3- MORFOMETRÍA LINEAL</u>	63
<u>VII.4- FACTOR FORMA</u>	64
<u>VII.5- RAZÓN DE ELONGACIÓN</u>	65
<u>VII.6- ÍNDICE DE CIRCULARIDAD</u>	66
<u>VII.7- SÍNTESIS DE VARIABLES MORFOMÉTRICAS.....</u>	68
<u>VII.8- VARIABLES FÍSICAS</u>	70
<u>VII.8.A - PENDIENTE MEDIA</u>	71
<u>VII.8.B - DENSIDAD DE LA RED DE DRENAJE.....</u>	72
<u>VII.8.C- COEFICIENTE DE RUGOSIDAD</u>	73
<u>VII.8.D - SÍNTESIS DE VARIABLES FÍSICAS.....</u>	74
<u>VII.9- VARIABLES ANTRÓPICAS</u>	77
<u>VII.9.A- INTRODUCCIÓN.....</u>	77
<u>VII.9.B -EXTENSIÓN DE CULTIVOS FORESTALES</u>	78
<u>VII.9.C -EXTENSIÓN DE SUPERFICIE AGRÍCOLA.....</u>	80
<u>VII.9.D-EXTENSIÓN DEL ECOSISTEMA DE PRADERA</u>	82
<u>VII.9.E -INTEGRACIÓN DE VARIABLES ANTRÓPICAS.....</u>	85
<u>VII.9.F- SÍNTESIS DE VARIABLES ANTRÓPICAS</u>	87
<u>VII.10- ANÁLISIS DEL PROCESO DE EROSIÓN EN MICROCUENCAS</u>	
.....	¡Error! Marcador no definido.9
<u>VII.10.A- FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA MICROCUENCAS.....</u>	¡Error! Marcador no definido.
<u>VII.10.B- ASOCIACIÓN ENTRE VARIABLES MORFOMÉTRICAS Y FÍSICAS.....</u>	90
<u>VII.10.C- CORRELACIÓN DE VARIABLES.....</u>	92

<u>VII.10.C.1- CORRELACIÓN DE VARIABLES MORFOMÉTRICAS E INCREMENTO DEL ÁREA EROSIONADA</u>	92
<u>VII.10.C.2- CORRELACIÓN DE VARIABLES FÍSICAS E INCREMENTO DEL ÁREA EROSIONADA</u>	96
<u>VII.10.D- ASOCIACIÓN DE COMPONENTES MORFOMÉTRICOS, FÍSICOS Y ANTRÓPICOS EN LA EXPLICACIÓN DEL SISTEMA MICROCUENCAS</u>	101
<u>VII.10.E- CORRELACIÓN DE VARIABLES</u>	¡Error! Marcador no definido.04
<u>VII.10.E..1- CORRELACIÓN DE VARIABLE CAMBIO EN USO DEL SUELO CON AUMENTO DEL ÁREA EROSIONADA</u> .	¡Error! Marcador no definido.04
<u>VII.10.F - DISCUSIÓN DE RESULTADOS A ESCALA DE MICROCUENCAS</u>	¡Error! Marcador no definido.09
<u>VIII. MORFOMETRÍA DE CÁRCAVAS</u>	113
VIII.1- INTRODUCCIÓN	113
<u>VIII.2- TASA DE INCREMENTO DEL ÁREA DE LAS CÁRCAVAS</u>	114
<u>VIII.3- ANÁLISIS MORFOMÉTRICO DE LAS CÁRCAVAS</u>	122
<u>VIII. 3.A - MORFOMETRÍA LINEAL</u>	122
<u>VIII. 3.B- FACTOR FORMA (SOCZYNSKA, 1991)</u>	126
<u>VIII. 3.C- RELACIÓN DE ELONGACIÓN (SCHUMM, 1956)</u>	128
<u>VIII. 3.D- ÍNDICE DE CIRCULARIDAD (MILLER, 1953)</u>	130
<u>VIII.4- ANÁLISIS CUANTITATIVO DEL PROCESO EROSIVO EN LAS CÁRCAVAS</u>	¡Error! Marcador no definido.
VIII.4.A- INTRODUCCIÓN	132
<u>VIII.4.B- ANÁLISIS CUANTITATIVO DE DEPENDENCIA ENTRE LA TASA DE INCREMENTO DE LAS CÁRCAVAS Y LAS VARIABLES MORFOMÉTRICAS</u>	¡Error! Marcador no definido.
<u>VIII.4.C- ANÁLISIS CUANTITATIVO DE DEPENDENCIA ENTRE LA TASA DE CRECIMIENTO ABSOLUTO (TCA) DE LAS CÁRCAVAS Y LAS VARIABLES FÍSICAS</u>	¡Error! Marcador no definido.

VIII.4.D- ANÁLISIS CUANTITATIVO DE DEPENDENCIA ENTRE LA TASA DE CRECIMIENTO ABSOLUTO (TCA) DE LAS CÁRCAVAS Y LA ACTIVIDAD FORESTAL.....;**Error! Marcador no definido.**

IX. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....;**Error! Marcador no definido.3**

IX. 1- ANÁLISIS INTEGRADO DE FACTORES;**Error! Marcador no definido.**

IX.2- EXPRESIÓN CUANTITATIVA DEL INCREMENTO EN EL ÁREA DE LA SUPERFICIE DE LAS CÁRCAVAS.....;**Error! Marcador no definido.**

X. CONCLUSIONES;**Error! Marcador no definido.5**

BIBLIOGRAFÍA;**Error! Marcador no definido.**

RESUMEN

El trabajo presenta la caracterización cuantitativa del proceso evolutivo de las cárcavas localizadas al sur de la Ruta Nacional N° 10 en el Parque Lacustre Garzón (Rocha, Uruguay). Se analizó la incidencia ponderada de factores morfométricos, físicos y antrópicos en el proceso erosivo y en el incremento en el área de la superficie de las cárcavas.

Para ello se utilizó como herramienta operativa el programa Arc- View Gis 3.2 con la finalidad de generar un Sistema de Información Geográfico que permitió realizar el seguimiento temporal de las formas de erosión, interpretar las modalidades de expansión y los cambios que se han producido en la geometría de las cárcavas.

Por último se formuló un modelo explicativo que, integrando los diversos factores, permite interpretar, con base empírica, la dinámica de procesos complejos que se producen en la zona de interfase costera y que inciden en la extensión de las cárcavas.

Palabras claves: cárcavas, erosión, morfometría, aplicación de SIGs, modelo de erosión costera.

ABSTRACT

This research presents the quantitative characterization of the evolutionary erosion processes in the gullies located at Parque Lacustre Garzon (Rocha, Uruguay).

The pondered incidence of morphometrical, physical and anthropical factors in the erosive processes and the expansion of the coastal gullies were studied.

It was used the Arc-View Gis 3.2 as an operational tool program to generate a Geographic Information System to analyse the temporary forms of erosion, to interpret the modalities of expansion and the changes that have occurred on the geometry of the gullies.

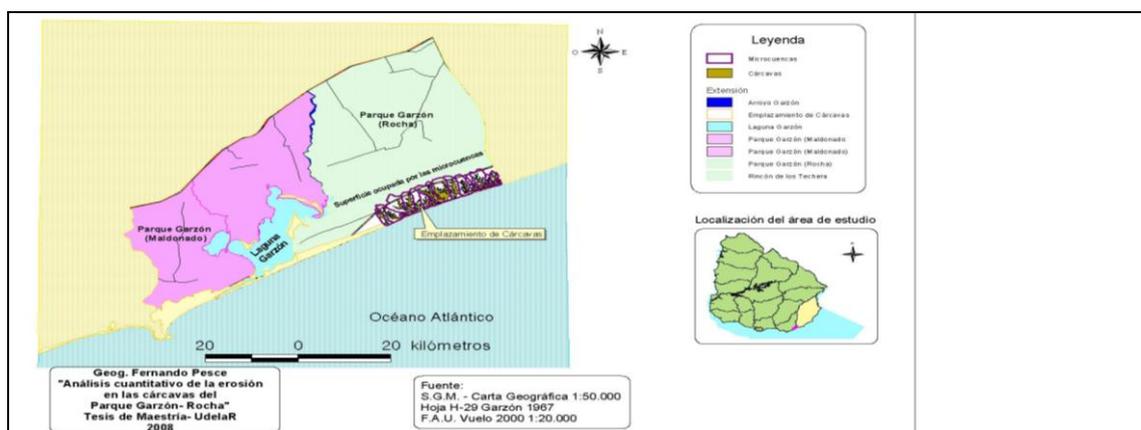
Finally, it presents the formulation of an explanatory model, integrating the various factors; the model allows the interpretation, with empirical basis, the gullies' dynamics and the complex processes that are influencing in the extension of them, that are unique at the area of coastal interface.

Key words: gully erosion, morphometry, GIS application, coastal erosion model.

I- INTRODUCCIÓN

En el sureste del Parque Lacustre Garzón (Departamento de Rocha, Uruguay) se desarrolla una serie de 22 cárcavas que se extienden a lo largo de una superficie de 1494 hectáreas con límite noroeste- norte en la Ruta Nacional N° 10 y límite sur en el cordón de dunas del Océano Atlántico. (Fig. 1)

Figura 1- Parque Lacustre Garzón: extensión del área de estudio



Con un proceso erosivo muy dinámico, esas cárcavas han atravesado distintos estados de situación a lo largo de las décadas abarcadas en el período -1943/ 2000- (González *et.al*, 2003).

En algunas de ellas, el proceso de erosión ha sido permanente, en otras lo ha sido en algún momento y luego se detuvo y en otras las fluctuaciones fueron periódicas.

Del total de las hectáreas en las que se emplazan las cárcavas, el área ocupada por las mismas representaba el 16,69% en el año 1943, ascendiendo al 24,9% en el año 2000¹.

Este incremento del 7,60% de la superficie erosionada en el transcurso de casi seis décadas es un indicador de la dinámica geomorfológica en el paisaje de cárcavas.

El incremento en el área de la superficie de las cárcavas motivó la realización de este trabajo de tesis, e indagar sobre el conjunto de variables morfométricas, físicas y socio-económicas que ponderada e interrelacionadamente pudieran estar incidiendo en los procesos forzantes del fenómeno constituyó el hilo conductor orientador de la investigación.

El poder arribar a un modelo interpretativo de la dinámica de las cárcavas fue la finalidad pretendida.

¹ González, Verónica *et al.* (2003). Diagnóstico ambiental del Parque Lacustre Garzón. Rocha, Uruguay. Monografía para el curso Diagnóstico ambiental. Maestría en Ciencias Ambientales. UdelaR. Montevideo.

II- JUSTIFICACIÓN

El Parque Lacustre Garzón tiene como particularidad que los diferentes ecosistemas y sitios geomorfológicos que lo integran son intrínsecamente vulnerables. Este hecho se incrementa dada la proximidad a centros turísticos de relevancia internacional que, con la próxima construcción del puente que interconectaría los Departamentos de Maldonado y Rocha a través de la Ruta N° 10, dará continuidad al corredor turístico más importante del país. (Fig.2)²

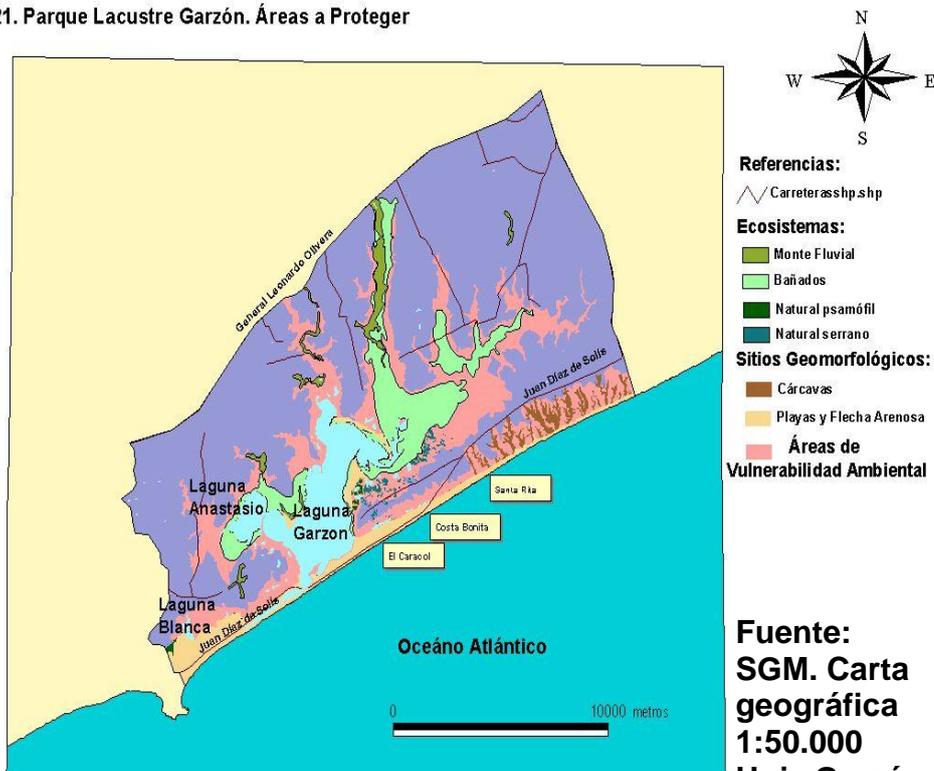
Con respecto a los sitios geomorfológicos de interés, estudios que regionalizaron el área propusieron que “(...) se destacan el paisaje de cárcavas litorales, la flecha arenosa lagunar y las playas oceánicas. (...) La sucesión de 22 cárcavas al sureste constituye un paisaje geomorfológico de singularidad paisajística que se debería preservar.”³

² González, V. (op.cit).

³ González, V. (op.cit).

Figura 2- Parque Lacustre Garzón: áreas de vulnerabilidad ambiental

Mapa 21. Parque Lacustre Garzón. Áreas a Proteger



cárcavas constituyen un paisaje representativo “(...) por los procesos geomorfológicos, geoquímicos y otras dinámicas que tienen lugar en la generación de sus formas. También son un paisaje de calidad estética y de particular interés para los visitantes. La protección de zonas de cárcavas sobre la costa permitirá una mayor comprensión de sus procesos de generación y evolución”.⁴

Por lo que es necesario un conocimiento de la dinámica de los procesos erosivos que afectan la superficie de las cárcavas para así poder generar una tipología que explique las distintas modalidades en el desarrollo de las mismas y permita formular un modelo interpretativo de la complejidad del fenómeno.

El esbozo de un modelo explicativo del comportamiento diferencial de las cárcavas con fundamentos cuantitativos y con base empírica, es condición indispensable para poder

⁴ De Álava, D.; Panario, D.; Fernández, G. (1994). Estudios para la propuesta de un manejo integrado de la zona costera del departamento de Rocha (propuesta preliminar). UNCIEP. Facultad de Ciencias, Montevideo, Uruguay.

comprender el avance de la erosión y el aumento en el área de la superficie de las cárcavas.

III. ANTECEDENTES

En la década de 1980 se desarrollaron investigaciones en el área (Villwock *et.al.* 1986) que concluyeron que las cárcavas se originaron y evolucionaron en materiales geológicos sedimentarios de relativa inestabilidad, correspondiente a depósitos marinos de aproximadamente 135.000 años AP (Formación Chuy). Desde el punto de vista litoestratigráfico esa formación geológica está constituida por una alternancia de areniscas finas y lutitas fosilíferas del Pleistoceno y Holoceno Inferior en los niveles más altos, de ambientes marinos y costeros mixohalinos producto de cambios relativos del nivel del mar, como consecuencia de la sucesión de episodios glaciales e interglaciales (Preciozzi *et.al.* 1985).

Estudios efectuados posteriormente (de Álava *et al.* 1994) sostuvieron que la inestabilidad de los depósitos sedimentarios en esta zona se debe a que presentan una

secuencia estratigráfica que alterna materiales con cierto grado de movilidad, producto de diferencias en la textura y que esa inestabilidad asociada a oscilaciones del nivel del mar, habría sido el factor que inició los procesos erosivos que dieron origen a las cárcavas. Al referir a la dinámica geomorfológica para explicar el proceso de avance de las mismas, los autores sostuvieron que éstas son producidas por las aguas de escorrentía en pendientes inestables y vegetación abierta por efecto del sobre pastoreo, según las características del suelo y subsuelo. Y también destacaron la incidencia que podría tener el cloruro de sodio por el spray de agua marina en el incremento en la superficie de las cárcavas. “(...) Estas acciones producen un avance de las cárcavas hacia continente, dejando pequeñas terrazas y mesetas, en función de la estabilidad de las capas alcanzadas por el proceso erosivo y el balance entre aporte/ transporte de sedimentos”⁵

González *et.al.* (2003) efectuaron un diagnóstico ambiental del Parque Garzón, en el que abordaron, entre otros temas, la evolución espacio- temporal de las cárcavas. En ese estudio plantearon, a modo de hipótesis, algunas de las causas que explicarían el avance de las cárcavas. Afirmaron que las mismas constituyen el cauce natural del agua de escorrentía superficial, cuyos cursos fluviales son intermitentes, pero que actuarían con capacidad erosiva durante los eventos de precipitaciones torrenciales. Para explicar las causas del incremento en el área de la superficie de las cárcavas analizaron en forma aislada primero y luego de manera conjunta, algunas variables que supusieron intervenían en el proceso: el tamaño original de cada cárcava considerando el año 1943 como punto de inicio, la distancia de las cabeceras superiores con respecto a la Ruta N° 10 y el porcentaje del área forestada de las mismas. Así concluyeron que existiría cierta tendencia a que se produzcan mayores incrementos relativos en el tamaño de las

⁵ De Alava, D.; Panario, D.; Fernández, G. 1994. Estudios para la propuesta de un manejo integrado de la zona costera del departamento de Rocha (propuesta preliminar). UNCIEP. Facultad de Ciencias, Montevideo, Uruguay.

cárcavas a medida que el tamaño inicial de la serie temporal sea mayor. Con respecto a la influencia de la Ruta Nacional N° 10 expresaron de que existiría una tendencia a que los procesos erosivos fueron mayores en aquellas cárcavas que están más próximas a la carretera. Este fenómeno se explicaría a partir del trazado de la ruta sobre cotas con mayor altitud que el emplazamiento de las cárcavas y durante eventos de precipitación torrencial, el asfaltado y la ausencia de canalizaciones paralelas a la ruta, al concentrar el agua de escorrentía superficial en las cabeceras incrementaría los procesos erosivos. Y con respecto a la forestación establecieron que en general, las cárcavas que más incrementaron el área fueron aquellas forestadas en más del 20% con eucaliptus a partir de 1986. Al integrar las tres variables concluyeron que las cárcavas con mayor extensión, próximas a la ruta y forestadas con eucaliptus a partir de 1986, son la que incrementaron la superficie erosionada, mientras que aquellas de pequeña extensión, no forestadas y lejanas a la ruta, han permanecido relativamente estables. Además, que los intentos por detener el avance de las cárcavas, tales como los cultivos forestales, parecerían no ser eficientes con la introducción de eucaliptus, que altera a través de la interceptación, los efectos de las precipitaciones sobre la frágil e inestable estructura de los suelos. Por último concluyeron que la ausencia de previsión en el manejo de las aguas de escorrentía al construirse la Ruta N° 10, tendería a incrementar la erosión a partir del socavamiento en las cabeceras de las cárcavas próximas a la misma, acentuando los procesos desencadenados por los cultivos forestales.

Otra investigación sobre la dinámica geomorfológica en el litoral costero atlántico (de Álava 2007) planteó que el desarrollo de las cárcavas se produce en el espacio definido como la Zona Litoral Activa Supra, o sea aquella que se extiende desde las dunas frontales hacia la parte del interior del continente en donde finaliza el transporte de arena por el viento, y en la que los procesos que ocurren se enmarcan en un predominio

de las energías eólicas y en las dinámicas de los cauces pluviales. Se estableció que se produce un transporte de sedimentos hacia la zona de playa a través de cauces semipermanentes que conducen las escorrentías pluviales hacia la costa. Asimismo se sostuvo que la forestación, no logró el objetivo de detener el avance de las cárcavas sino que por el contrario, actuó acelerando la erosión⁶.

En síntesis, todos los estudios que anteceden este trabajo vinculan a la inestabilidad geológica, la fragilidad de los suelos, la vegetación poco densa y abierta, el sobrepastoreo y la forestación con las causas físicas y antrópicas que inciden en los procesos de erosión pluvio- fluviales que incrementan la superficie del área ocupada por las cárcavas.

IV. ASPECTOS TEÓRICOS

IV.1 - ORIGEN Y DINÁMICA DE LAS CÁRCAVAS

Las cárcavas son canales o zanjas producidas por la erosión hídrica que reflejan perturbaciones que se producen en la dinámica morfológica del paisaje y que, como fenómeno, se suceden en todas partes del mundo (Darby y Simon, 1999).

En la terminología universal, las áreas con cárcavas reciben el nombre de "bad lands".

Las condiciones físicas que en combinación inciden para que se formen las cárcavas son (Cicassi y Palmieri, 1987); (Uzon, 1992); (Cayssials *et al.*, 1995):

- Precipitaciones con duración e intensidad suficiente (efecto de torrencialidad).
- Cobertura vegetal abierta, poco densa, escasa.
- Suelos con estructuras que favorezcan la escorrentía.
- Materiales geológicos blandos o no consolidados.
- Diferencias pronunciadas en la pendiente dadas por la energía del relieve.

⁶ De Álava, D. (2007). Incidencia del proceso de transformación antrópica en el sistema costero La Paloma- Cabo Polonio, Facultad de Ciencias, (UdelaR). Uruguay.

Las cárcavas evolucionan creciendo longitudinal, vertical y lateralmente. En planta, poseen una forma digitada, es decir, que poseen entrantes en forma de dedos, los cuales 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 avance de las cabeceras de la cárcava determina el crecimiento en longitud de la misma y consecuentemente el aumento en el resto de sus dimensiones; y el incremento en el ancho se produce a través de los taludes laterales. La cárcava crece remontando la ladera hasta agotar su capacidad de captación de agua, minimizando la vertiente, por lo que su máxima longitud potencial está dada por la existencia entre el talweg del valle y la divisoria de aguas (Sganga, 1999).

Si bien no se han desarrollado estudios específicos sobre el origen de las cárcavas presentes en el Parque Lacustre Garzón hasta la actualidad, el modelo interpretativo vigente las vincula a la dinámica erosiva producto de la incidencia de las variables naturales y socio- económicas del dominio terrestre.

Al respecto, algunos reportes científicos (Villwock *et al.* op.cit) han establecido la hipótesis que plantea que estas cárcavas se han desarrollado y evolucionado en materiales geológicos sedimentarios inestables de la denominada Formación Chuy.

En efecto, esos depósitos fueron producto de eventos de ingesión/ regresión marina a partir de los cuales se habría generado el escenario propicio para desencadenar los procesos erosivos que habrían originado el actual padrón de cárcavas. El retroceso marino habría producido una pendiente pronunciada y un abarrancamiento generado entre la berma y el frente de playa. La extensión de la franja costera hacia el antiguo litoral oceánico y la consolidación de una nueva franja litoral, serían los factores que

habrían generado un desnivel interrumpido por un abarrancamiento (Tarbuck y Lutgens, 2008).

Las cárcavas 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 se produzca la formación de cárcavas, que 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. (Viers, 1983).

De Álava *et al.* (op.cit) establecieron una hipótesis que pretendió contextualizar la dinámica de las cárcavas a la extensión geográfica de las mismas en la interfase litoral oceánica sosteniendo que la inestabilidad –geológica- , asociada a movimientos eustáticos en la franja costera habría sido el factor que inició los procesos erosivos que se evidencian en la propia dinámica de las cárcavas.

Las cárcavas constituyen el cauce natural del agua de escorrentía superficial, cuyos cursos fluviales son intermitentes, pero que actúan con capacidad erosiva durante los eventos de precipitaciones torrenciales. El desagüe se produce en el litoral oceánico, hasta donde los caudales transportan las distintas fracciones sedimentarias y al mismo tiempo interconectan las cárcavas con la playa.

La dinámica geomorfológica que explica la extensión de las cárcavas se comprende como la síntesis entre factores endógenos, - vinculados a la erodabilidad intrínseca de las mismas como producto de sus formas geométricas y factores físicos- y factores exógenos que actúan como forzantes del proceso erosivo y que involucran a factores

naturales y antrópicos. Entre los primeros estaría el potencial erosivo de las precipitaciones y dentro de los segundos factores, los usos del suelo.

Los modelos cuantitativos que intentan explicar el avance de las cárcavas (Bocco, 1991); (Funes *et al.*, 1996) sostienen que es imprescindible el 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)⁷ plantea que la extensión de cada cárcava está en estrecha relación con el área de la cuenca, proponiendo la siguiente ecuación:

$$E = (A)^h K$$

- **E – Extensión horizontal de la cárcava**
- **A- Área de drenaje**
- **K y h- Constantes de calibración.**

Esta expresión cuantitativa está indicando que en una cuenca, bajo condiciones ambientales regulares de erosión hídrica, midiendo la evolución temporal de la superficie de las cárcavas es factible calibrar la ecuación a los efectos de predecir el avance de la erosión.

Es así que para abordar el proceso erosivo severo que tiene sus manifestaciones en las cárcavas es necesario integrar los factores físicos y antrópicos que, a nivel de microcuencas, inciden en el mismo, tales como “(...) la pendiente, las características del subsuelo y del suelo en que se inscriben, el padrón de drenaje superficial y subsuperficial natural o antrópico, la vertiente de captación (cuenca) y la cobertura

⁷ Citado por Sganga, J. (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.

vegetal relacionada al uso de la tierra, que son las determinantes fundamentales en relación con la expansión y dimensiones que alcanza una cárcava individual o un patrón de cárcavas”.⁸

Reportes científicos muy recientes (Leyland y Darby, 2008) sostienen que para el caso de cárcavas costeras, los modelos interpretativos clásicos resultan insuficientes porque asumen una serie de condicionantes que no siempre se ajustan para explicar el origen y la dinámica de las mismas.

Estos autores proponen un modelo para comprender el avance o estabilidad de las cárcavas en función del comportamiento longitudinal del escurrimiento fluvial. Y además consideran que estas cárcavas, localizadas en la zona de interfase continental-oceánica son de interés, por su propia dinámica interna (de la que reconocen 5 estadios evolutivos) así como por la interacción entre procesos terrestres- marítimos.

Sin embargo el estudio fue desarrollado en un contexto geográfico muy particular, que lo vuelve intransferible para describir los procesos geomorfológicos que se producen en el Parque Lacustre Garzón, pues el sistema de cárcavas que reportaron, localizado en el sureste de la Gran Bretaña, refiere a un tipo especial de cárcavas costeras denominadas “chines” que se desarrollan como producto de la erosión remontante en cursos fluviales con caudal permanente y que tienen desembocadura en el mar a partir de cauces colgados.

En síntesis, para explicar el incremento en el área de la superficie de las cárcavas se deben definir un conjunto de factores morfométricos, físicos y antrópicos que inciden en los procesos erosivos y es necesario que sean analizados cuantitativamente a partir de variables que se utilicen como descriptivas de cada uno de ellos, tanto a nivel de las microcuencas en las que evolucionan las cárcavas como a nivel de las propias cárcavas.

⁸ Sganga Juan. (op.cit).

IV.2- PROPIEDADES MORFOMÉTRICAS DE LAS

MICROCUENCAS

Las propiedades morfométricas de las cuencas hidrográficas proporcionan una descripción de la extensión y formas de las mismas y permiten realizar comparaciones entre distintas cuencas hidrográficas. Al mismo tiempo, estas propiedades permiten extraer conclusiones preliminares sobre las características ambientales del territorio a partir de la descripción precisa de la geometría de las formas terrestres, principalmente las que tienen como origen los procesos de erosión en las cuencas. Estas unidades básicas permiten coleccionar, organizar y analizar información sobre la geometría de las formas terrestres determinadas por la erosión fluvial. (Chorley, 1971)

El factor morfométrico, definido por las variables consideradas representativas para medir la incidencia de las formas geométricas en los procesos de erosión, puede constituir un primer criterio para una tipificación de las cárcavas.

Las propiedades morfométricas simples de la cuenca hídrica y del diseño de la red de drenaje con respecto a ella, además de aportar datos numéricos concretos, permiten posteriormente utilizar los mismos para establecer razones e índices más complejos a los

efectos de modelar la forma de la cuenca en relación a figuras geométricas que se asocian a la probable condición de erodabilidad.

El interés por los estudios morfométricos asociados al análisis cuantitativo de los procesos de erosión ha sido recurrente en la academia geográfica motivada por distintas razones.

Así en la mitad del siglo XX bajo la influencia de las corrientes cuantitativas en Geografía Física los investigadores pretendieron encontrar modelos matemáticos predictivos. (Horton, 1945; Miller, 1957; Strahler, 1964). En la década de 1980 nuevos impulsos en este tipo de investigaciones se vincularon a la planificación territorial (Day, 1980; Jardí, 1985) incluso en Uruguay (Cayssials, 1995) y en la última década, dado el potencial técnico aportado por los SIG, se convalidan los estudios morfométricos a los efectos de generar estrategias para el ordenamiento ambiental del territorio (Senciales, 1999)

Soczynska (1991) sostiene que los parámetros morfométricos para determinar la forma de la cuenca son:

Factor Forma: se determina a partir del cociente entre el ancho medio de la cuenca (A_m) y el largo máximo de la misma (L_m). Este indicador pretende parametrizar la cuenca de tal manera que a través del mismo se obtenga una aproximación a su forma geométrica, la cual puede tender a la circularidad o a la elongación.

Razón de Circularidad: Fue propuesto por Miller en 1953 y (R_c) se calcula a partir del cociente entre el área de la cuenca (A) y el área de un círculo que tiene un perímetro igual al perímetro de la cuenca (P). Los valores oscilan entre 0- 1 y cuanto más tiende a la unidad la forma de la cuenca es más circular.

Razón de Elongación: Lo propuso Schumm en 1956 y (R_E) se determina a partir del cociente entre el diámetro de un círculo de área igual a la de la cuenca y el largo máximo (L_m) de la misma.

Índice de Compacidad: Fue formulado por Gravelius en 1914 y (C_c) se obtiene a partir del cociente entre el perímetro de la cuenca (P) y el perímetro de un círculo de área igual al área de la cuenca. Cuando más tienda el valor de este índice a la unidad, se considera que la cuenca tiene tendencia a la circularidad y por lo tanto es más compacta

Los índices que se aplican para determinar la forma de la cuenca tienen como objetivo parametrizar la misma y a partir de las figuras geométricas resultantes compararlas con modelos teóricos pre- establecidos que se orientan específicamente a determinar el modo de escurrimiento que tiene la misma y en su función, 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.

Es por ello que las “(...) 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 todos 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” (Senciales, 1999).

Así pues, 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”.⁹

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

⁹ Ward y Robinson (2000). “Principios de Hidrología”. Ed. Mac Graw- Hill. Londres.

momento de crecida en la desembocadura, pero al mismo tiempo, más acusada y súbita es la misma crecida y por lo tanto más alto el riesgo de inundación.

Si se parte de la premisa de que las cárcavas “(...) constituyen cursos de agua incisivamente inscriptos en las laderas, sujetos a avenidas intermitentes durante las tormentas”¹⁰ y se asume a la cárcava como una microcuenca con formas geométricas que le son propias y que actúan como una variable intrínseca a la erodabilidad, es que se debieran considerar el Factor Forma, la Razón de Elongación y el Índice de Circularidad como variables definitorias del factor morfométrico. Estas variables hidrológicas en sí mismas le estarían imprimiendo a las cárcavas una tendencia a disipar o concentrar energía erosiva como producto de su geometría. Por lo que la proyección de los análisis cuantitativos de las formas de erosión aplicando las variables morfométricas de las microcuencas a las cárcavas podría resultar una convalidación metodológica al momento de interpretar los procesos erosivos que las afectan. De ahí que si bien las variables morfométricas son de aplicabilidad para evaluar la erodabilidad en las microcuencas, se evaluará su aplicabilidad para explicar el fenómeno a escala de las cárcavas.

FACTOR MORFOMÉTRICO

VARIABLES DESCRIPTIVAS SELECCIONADAS

MICROCUENCAS	CÁRCAVAS
Factor Forma	Factor Forma
Razón de Elongación	Razón de Elongación
Índice de Circularidad	Índice de Circularidad

¹⁰ Hudson, R. (1982). “Conservación del suelo”. Ed. Reverté S.A. Barcelona. Citado por Sganga. (op.cit).

IV.3 - PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS MICROCUENCAS

Las propiedades físicas de las microcuencas están vinculadas con la topografía, con la red de drenaje y con las características ecológicas del territorio (Chorley, 1971); (Soczynska, 1991). 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. (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 (Senciales, 1999).¹¹

Strahler (1986) enunció que “(...) la morfometría fluvial denota la medida de las propiedades geométricas de la superficie sólida de un sistema de erosión fluvial”.¹²

¹¹ Senciales J. (1999). Redes Fluviales. Metodología de Análisis. Serie Estudios y Ensayos No. 34. Universidad de Málaga.

A su vez, González de Matauco (2004)¹³ 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).

El enfoque sistémico constituye una herramienta metodológica para el abordaje de las cuencas hidrográficas que permite identificar los componentes o subsistemas que las integran, describir los atributos de cada uno de ellos y analizar en forma integrada los procesos e interacciones que se producen al interior de las cuencas hídricas producto del balance cualitativo y cuantitativo entre los ingresos y circulación de materia, energía e información en el sistema y los egresos que se producen desde el mismo (Cayssials, 2004). Desde esta perspectiva, la erosión severa manifestada a través de las cárcavas estaría evidenciando desajustes en los procesos internos de la dinámica del sistema respondiendo a factores forzantes: morfométricos, físicos y antrópicos.

Chorley (1971)¹⁴ señaló que la cuenca hidrográfica constituye una unidad topográfica, hidrológica e hidráulica, que proporcionó las bases para el sistema morfométrico propuesto por Horton (1945) posteriormente modificado por Strahler (1964).

¹² Strahler, A. (1986). Tratado de Geografía Física. Ed. Omega. Barcelona.

¹³ González de Matauco I. (2004). Análisis morfométrico de la cuenca y red de drenaje del río Zadora. En: Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles No. 38.

¹⁴ Chorley Richard. (1971). Introducción a la Hidrología Física. Ediciones METHUEN. Londres.

La cuenca hidrográfica es considerada como una unidad básica del paisaje debido a que es una unidad topográfica claramente definida, con límites precisos y con un diseño de la red de drenaje jerarquizada a través del tamaño y de los órdenes de los cursos fluviales; y porque es un sistema físico abierto en el que se producen entradas de precipitación y radiación solar y salidas de descarga, evaporación e irradiación. Por lo que, el análisis cuantitativo de las variables físicas seleccionadas permite luego, analizar la relación con la tasa de incremento de la superficie de las cárcavas.

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 red de drenaje proporciona pautas para determinar los nudos externos que dan inicio a las cabeceras, los distintos segmentos fluviales y los nudos internos dentro de la red de drenaje.

La **densidad de la red de drenaje** (Horton, 1945) se obtiene a partir del cociente entre la longitud de los cauces que conforman el sistema fluvial de la cuenca, expresados en Kilómetros y el área total de la unidad hidro-espacial expresada en Kilómetros², debiéndose interpretar el resultado como el número de cauces existentes por Km². Este es un indicador de la capacidad de encauzamiento de las precipitaciones en cada microcuenca. La densidad de drenaje es una medida de textura del territorio de la cuenca y expresa el equilibrio entre el poder erosivo del caudal y la resistencia a la erosión expresada por las características geocológicas del territorio de la cuenca. Los factores que controlan la densidad de drenaje son:

- Litología del Sustrato.
- Permeabilidad del Suelo, capacidad de infiltración, y de aceptación del agua.
- Cobertura vegetal y tipo de la misma.

Estas características deben evaluarse en forma global ya que una alta densidad de drenaje expresaría materiales geológicos friables, suelos relativamente impermeables o escasa cobertura vegetal. Constituye por lo tanto un indicador del potencial de erodabilidad intrínseco al territorio en estudio.

Los materiales geológicos duros y resistentes tales como el granito, gneiss, y cuarcitas, tienden a originar bajas densidades de drenaje. Esto es debido a que la erosión fluvial es difícil (...) En materiales blandos, tales como margas y arcillas, las cuencas por pequeñas que sean, pueden suministrar la esorrentía suficiente como para erosionar el cauce (...) Los materiales muy permeables, como las arenas o las gravas tienden a originar bajas densidades de drenaje, dado que la infiltración es grande (...) Una roca débil producirá mucha menos densidad de drenaje en un clima húmedo, donde una espesa cobertura vegetal protege el material subyacente que en una región árida, donde no existe dicha cobertura. (Strahler, op.cit).

Cooke y Doornkamp (1974)¹⁵ sostienen que la dinámica erosiva de la red hidrográfica es el resultado de un sistema de transferencia de materia y energía cuyo grado de eficiencia se refleja en la disposición de la red de drenaje.

Y por último, la densidad de la red de drenaje manifiesta la capacidad de entalle de los cauces fluviales y el equilibrio dinámico del sistema fluvial acorde a determinadas condicionantes hidrológicas, geomorfológicas y ecosistémicas.

La **pendiente media** (Morisawa, 1962) ponderada para cada microcuenca se calcula a través del cociente entre el producto de la longitud de las curvas de nivel y la equidistancia entre ellas y el área de cada microcuenca.

El resultado es multiplicado por 100 para obtener la pendiente en porcentajes.

¹⁵ Cooke y Doornkamp. (1974). "Geomorfología y Gestión Ambiental". Oxford University Press. Londres.

Este parámetro indica la energía del relieve para cada microcuenca, hecho que determina la velocidad del escurrimiento del agua superficial indicando la probabilidad de riesgo de erosión hídrica.

El análisis cuantitativo de esta variable es fundamental para el manejo integrado de las microcuencas ya que la relación pendiente media - erosión está estrechamente vinculada a la cobertura vegetal, tipo de suelo y su capacidad de infiltración.

El **coeficiente de rugosidad** (reformulado por Soczynska, 1991) se determina a partir del producto entre la densidad de la red de drenaje y la pendiente media de cada microcuenca.

La pendiente media está relacionada a la energía del relieve y por lo tanto los valores específicos para cada microcuenca no necesariamente evidencian una determinada localización en la cuenca global. Se relacionan geomorfológicamente a cambios abruptos del relieve.

Con respecto a la densidad de la red de drenaje, la misma pone de manifiesto algunos aspectos físico - naturales que evidenciarían una capacidad intrínseca del territorio a la erodabilidad, tales como geología poco resistente, suelo impermeable o cobertura vegetal incapaz de contener y controlar la escorrentía superficial en períodos lluviosos.

La combinación de los parámetros densidad de la red de drenaje y pendiente media, determina el coeficiente de rugosidad, por lo que esta última variable permite integrar a las otras dos variables físicas e incluirlas al momento de evaluar la relación de dependencia con la tasa de incremento de la superficie erosionada manifiesta en las cárcavas.

Del conjunto de variables seleccionadas como descriptoras del factor físico, las únicas que pueden ser trasladables para el análisis morfométrico de las cárcavas en su extensión en el plano horizontal son la jerarquización de la red de drenaje y la desnivelación topográfica. Ambas variables pueden relacionarse con la tasa de extensión superficial de las cárcavas a los efectos de medir su relación de interdependencia. La desnivelación topográfica fue

sustituida por la pendiente media (que fue considerada como variable física a escala de microcuencas) dado que, al no proponerse como objetivo estudiar la dinámica tridimensional de las cárcavas no podía cuantificarse la variable con la exactitud requerida a esa escala de análisis.

FACTOR FÍSICO

VARIABLES DESCRIPTIVAS

MICROCUENCAS	CÁRCAVAS
Jerarquización fluvial	Jerarquización de cauces
Densidad de la red de drenaje	Desnivel topográfico
Pendiente Media	
Coefficiente de Rugosidad	

IV.4 - FACTORES ANTRÓPICOS

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 subsuperficial. Es por ello que “(...) las mutaciones sistemáticas en los usos de los suelos en los paisajes agropecuarios, producen una variabilidad histórica en el sistema suelo¹⁶. El conocimiento de los ritmos y orientación de esta variabilidad constituye un insumo imprescindible para orientar el trabajo de gestión sustentable (...)”¹⁷. Por lo que la cartografía temática acompañada de leyendas respectivas permite comprender la evolución geográfica- temporal de las variables ambientales que actúan en los procesos de extensión del padrón de cárcavas.

¹⁶ Mielniczuk, J. (1999). “Materia orgánica y sustentabilidad de sistemas agrícolas”. Citado por Achkar, M. (2002). En: “Evaluación de la distribución espacial de la materia orgánica del horizonte superficial del suelo”. En Perfil Ambiental del Uruguay 2002. Nordan. Montevideo.

¹⁷ Assad, M *et al.* (1998). “Sistemas de Información Geográfica en la evaluación de tierras para la agricultura”. Citado por Achkar M. (op.cit).

En la actualidad, el uso de herramientas operativas como los SIG y las técnicas de percepción remota, permiten realizar la secuenciación temporal de los cambios en los usos del suelo y cuantificar tales modificaciones.

Con respecto al factor antrópico, la variable representativa seleccionada es usos del suelo y cambios ocurridos en ellos durante el período de estudio.

La variable señala la cobertura del suelo como un factor de resistencia o susceptibilidad a la erosión hídrica, partiendo del supuesto de que contempla la capacidad de la cobertura de amortiguar el impacto de la caída de las gotas de lluvia sobre el suelo provocando su disgregación física, aumentando a través de las raíces la capacidad de infiltración y disminuyendo la escorrentía superficial en volumen y velocidad; hechos estos que atenúan la erosión.

La estructura y dinámica de las microcuencas y de las cárcavas como sistemas abiertos conllevan implícita la noción de que, cualquier transformación acaecida genera respuestas que traducen los cambios en el equilibrio dinámico.

Esos síntomas se reflejan en el aumento de la superficie erosionada y las cárcavas son los indicadores definidos a partir del fenosistema, o sea aspectos ambientales fácilmente perceptibles en el paisaje; mientras que los signos u orígenes de los síntomas, pertenecen al ámbito del denominado criptosistema, es decir todos aquellos fenómenos y procesos que no se pueden visualizar o percibir directamente en el paisaje, pero que resultan ser causas complejas de la situación ambiental imperante (González Bernáldez, 1981). Las modificaciones en la estructura y funcionalidad de los ecosistemas y en los usos del suelo, son desencadenantes de procesos que modifican el patrón de escurrimiento subsuperficial y superficial; y tales cambios se expresan en el paisaje geográfico. Es por ello que el análisis cuantitativo de los cambios ocurridos en el uso del suelo de un territorio puede relacionarse directamente con la tasa de incremento de

la superficie erosionada de una cuenca si las prácticas antrópicas no se fundamentan en criterios de sustentabilidad ambiental.

FACTOR ANTRÓPICO

VARIABLES DESCRIPTIVAS

MICROCUENCAS	CÁRCAVAS
Usos del suelo	Usos del suelo
Cambios en los usos del suelo	Cambios en los usos del suelo

IV.5- SÍNTESIS de los ASPECTOS TEÓRICOS

Los procesos geomorfológicos causantes del aumento en el área de la superficie de las cárcavas se asocian a la conjunción de factores naturales y antrópicos. Dentro de los factores naturales, las variables hidrológicas, geomorfológicas, edáficas y bióticas se combinan entre sí y éstas en interacción con los factores antrópicos, dentro de los que se destacan los cambios en los usos del suelo, generando escenarios ambientales que pueden favorecer la génesis y evolución de los sistemas de cárcavas (Santiago, 2007).

Las cárcavas activas son aquellas en las que el incremento en el área de su superficie se refleja a partir de la extensión longitudinal (largo), lateral (ancho) y vertical (profundidad) como producto de la interacción de factores naturales, antrópicos y morfométricos. Es por ello que la selección de variables descriptivas de cada uno de los factores, que puedan ser identificables y cuantificables, es condición necesaria para poder identificar ponderadamente cómo éstas se vinculan con el incremento de la extensión de las cárcavas. Estas variables descriptivas se discriminaron para las dos

unidades de análisis geográfico del fenómeno; a nivel de las microcuencas que contienen las cárcavas y a nivel intrínseco a las propias cárcavas. Para el estudio de los factores forzantes del proceso erosivo a escala de las cárcavas se agregan las variables morfométricas, que si bien fueron formuladas para estudios de la incidencia de las formas geométricas de las microcuencas en la vulnerabilidad a la erosión, en este trabajo se utilizaron para evaluar la relación de dependencia entre estas variables y el incremento en el área de la superficie de las cárcavas.

El análisis cuantitativo secuencial del proceso de erosión que hace incrementar la extensión de las cárcavas es posible una vez cuantificadas las variables descriptivas de los factores que remiten tanto a la erodabilidad propia de las cárcavas como a las microcuencas en las que las mismas se circunscriben.

V. INTERROGANTES- OBJETIVOS- HIPÓTESIS DE TRABAJO

V.1. INTERROGANTES

Las interrogantes que orientaron la investigación fueron:

- 1) ¿Es posible establecer una tipología de las cárcavas según las tasas de crecimiento del área de la superficie erosionada?
- 2) ¿Qué variables morfométricas, físicas y antrópicas son relevantes para explicar el proceso evolutivo de las cárcavas a nivel de las microcuencas en donde se localizan?
- 3) ¿Cuáles son las variables morfométricas, físicas y antrópicas intrínsecas a cada cárcava que se correlacionan e inciden directamente en la extensión del área de la superficie de las mismas?
- 5) ¿Es posible formular un modelo interpretativo del proceso geomorfológico de incremento en el área de la superficie de las cárcavas?

V.2. OBJETIVOS

V.2.1. OBJETIVO GENERAL

Analizar cuantitativamente la evolución de las cárcavas del Parque Lacustre Garzón, correlacionando este fenómeno con variables morfométricas, físicas y antrópicas que inciden en la expansión y cambios en las formas de cada una de ellas

V.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Describir cuantitativamente el crecimiento de las cárcavas entre 1943- 2000.
- Singularizar y validar variables morfométricas, físicas y antrópicas que permitan explicar la dinámica geomorfológica de las cárcavas.
- Analizar la incidencia ponderada de factores morfométricos, físicos y antrópicos en el incremento en el área de la superficie de las cárcavas.
- Lograr una tipología de las cárcavas según la diferencia de crecimiento en el área de la superficie erosionada.

V.3) HIPÓTESIS

Las hipótesis que se sostuvieron fueron que:

Hipótesis 1

El incremento del área y las modificaciones geométricas de las cárcavas responden a dos grupos de factores:

- a) Intrínsecos, determinados por la erodabilidad propia de cada cárcava como consecuencia de las propiedades morfométricas y las características físicas de las mismas, las que actuarían como condicionantes de los procesos erosivos.
- b) Extrínsecos, en el que diferentes variables naturales y antrópicas actuarían favoreciendo el incremento y la modificación en la geometría de las cárcavas, principalmente los cambios acaecidos en los usos del suelo entre 1943- 2006 en un territorio con condiciones ambientales de vulnerabilidad inicial.

Estos factores forzantes de los procesos que inciden en la extensión en el área de la superficie de las cárcavas actúan a escala de las microcuencas en las que se emplazan y también a escala propia de cada cárcava.

Hipótesis 2.

Existe un comportamiento diferencial del proceso evolutivo de la serie de cárcavas en función de la interacción entre variables morfométricas, físicas y socio- económicas que se manifiestan en forma jerárquica y que pautan la extensión horizontal y lateral de cada una de las geoformas.

VI. MATERIALES Y MÉTODOS

VI.1. MATERIALES

- Bibliografía relevante en torno a los siguientes temas:

- a. Erosión en cárcavas: factores intervinientes, dinámicas explicativas, modelos cuantitativos empíricos y/ o teóricos explicativos de los procesos de extensión horizontal de cárcavas, clasificación de cárcavas según estructura y dinámica, situación de la erosión en Uruguay, estudios de las cárcavas en la costa de Rocha.
- b. SIGs aplicados a la caracterización ambiental del territorio, a la evaluación y modelización de la erosión en cárcavas, monitoreo de la evolución de las cárcavas en el tiempo y espacio.

- Cartografía de base en formato digital, obtenida en el Servicio Geográfico Militar:
Cartas topográficas a escala 1:50.000, Hoja E- 28 Garzón y Hoja E- 29 José Ignacio.
- Fotografías áreas del Parque Lacustre Garzón a distintas escalas editadas por Servicio Geográfico Militar (SGM) o Fuerza Aérea Uruguaya (FAU):

Tabla N° I. Fotografías aéreas ingresadas al SIG

AÑO	FUENTE	N° FOTOS	ESCALA
1943	S.G.M.	501- 14V 501- 15V 501- 16R	1/ 40.000
1966	S.G.M.	65- 008 65- 114 65- 167 65- 120	1/20.000
1986	S.G.M.	3- 31	1/60.000
1998	F.A.U.	31- 34 31- 35 31- 38 31-39	1/ 25.000
2000	F.A.U.	8132 8135 8137	1/20.000

- Imagen satelital LANDSAT 7ETM 02/2005.
- 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 disponible en formato digital y a escala de zonas censales del departamento de Rocha según Censo General de Población, realizado en el año 2004 por el INE.
- Censos Agropecuarios y Anuarios Estadísticos aportados por DIEA- MGAP.
- Par de estereoscopios de espejo/ bolsillo.
- Software: Arc-View Gis 3.2, extensiones Image Analysis y Polygeom.
- Software: ERDAS Imaging Analysis 8.4.
- Software: SPSS.

- GPS. Fue utilizado para determinar posición astronómica de los puntos seleccionados durante los chequeos de campo y así poder georeferenciar posteriormente la información recabada.
- Máquina fotográfica digital, para el registro de imágenes relevantes en las salidas de campo.

VI.2. MÉTODOS

Georeferenciación de las cartas geográficas digitales E 29 (José Ignacio) y E 28 (Garzón) en base al programa Arc- View 3.2.

Confección de mosaico cartográfico tomando como fuentes las cartas georeferenciadas utilizando la extensión Image Analysis del programa Arc- View 3.2.

Diseño de las coberturas iniciales del SIG usando 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 la Hipsometría.
- Diseño de la red de drenaje primaria jerarquizada.

- Dibujo de la caminería e infraestructura vial.
- Delimitación de distintos usos del suelo y ecosistemas señalados en las cartas geográficas.

Foto lectura y foto interpretación del área estudiada en cada momento de los que se poseyó información gráfica en la secuencia temporal 1943- 2000:

- Delimitación de la extensión de las cárcavas.
- Definición geográfica de las microcuencas que contienen las cárcavas: topografía que las limitan y diseño de la red de drenaje.
- Separación de unidades territoriales según distintos usos del suelo y cobertura vegetal.

Ingreso de la iconografía aérea al programa.

Referenciación geográfica 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 3.2.

Rectificación Polinomial del total de las fotos aéreas correspondientes a los vuelos aerofotogramétricos de 1943, 1966, 1998, 2000 que permitieron realizar los fotos mosaicos del área para cada corte temporal, utilizando el programa ERDAS Imagine Analysis 8.4. Para ello se tomó como base el mosaico georeferenciado del área estudio en extensión .img. obtenido a partir de las cartas geográficas.

Clasificación no supervisada del total de las fotos aéreas correspondientes a los vuelos aerofotogramétricos de 1943, 1966, 1998, 2000 en base a la herramienta operativa ERDAS Imagine Analysis 8.4. Se clasificó la información de la iconografía en 6 clases: arenas, cárcavas, ruta, forestación, pradera estival y uso agrícola del suelo para identificar unidades de uso del suelo en el territorio.

Confección de mosaicos con las imágenes clasificadas en extensión .isodata.img para cada corte temporal disponible.

Conversión en fichero de formas en extensión .shp de los mosaicos con las imágenes clasificadas.

Diseño de las siguientes coberturas sobre iconografía aérea georeferenciada; se digitalizaron en pantalla las coberturas vectoriales (lineales, poligonales) que se detallan usando la herramienta Arc- View 3.2 y cálculo de las longitudes y áreas específicas usando la extensión Polygeom del programa.

- Delimitación de la extensión de las cárcavas.
- Definición geográfica las microcuencas que contienen las cárcavas: ajustes en la topografía que las limitan y diseño de la red de drenaje.
- Separación de las unidades territoriales según distintos usos del suelo y cobertura vegetal.

Realización de salida de campo a los efectos de chequear y actualizar la información obtenida a través de foto lectura y fotointerpretación.

Rectificación de las coberturas temáticas sobre los mosaicos con las imágenes clasificadas para corregir la extensión de las cárcavas en cada corte temporal.

Creación de coberturas temáticas a partir de las fotografías e imágenes ingresadas al SIG:

Se digitalizaron en pantalla las coberturas vectoriales (lineales, poligonales y de puntos) que se detallan para cada uno de los cortes temporales establecidos:

- Área estudio con la línea de costa.
- Canales de escurrimiento interiores jerarquizados de cada cárcava (método Strahler).
- Variables geométricas de las microcuencas: longitud máxima, ancho máximo.
- Red fluvial jerarquizada para cada microcuenca.

- Variables geométricas de las cárcavas: longitud máxima, ancho máximo, distancia a la ruta, distancia al mar.
- Carreteras y red de caminería.
- Ecosistemas predominantes.
- Predios: forma y extensión.

A partir de la cobertura Grupos de Suelos según Índice CONEAT, fueron confeccionadas las siguientes coberturas:

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

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

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

Medición del área de la superficie de las cárcavas para cada corte temporal efectuada con la extensión polygeom del Arc- view 3.2. Con los resultados obtenidos se calculó la ***tasa de crecimiento absoluta (TCA)*** a partir de la diferencia entre el valor del área de la superficie de las cárcavas en el momento considerado inicial (1943) y el momento final (2000), de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$TCA = [AC (2000) - AC (1943)] / AC (1943)$$

En donde:

TCA- Tasa de incremento del área de la superficie de la cárcava entre 1943- 2000.

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

Medición del área de la superficie ocupada por cada microcuena efectuada con la extensión polygeom del Arc- view 3.2 y cálculo del porcentaje ocupado por cada cárcava sobre el área total de cada microcuena en cada corte temporal del período considerado. Se calculó la diferencia de incremento de la superficie de las cárcavas para cada microcuena (ΔEt). **La Diferencia de Incremento de la Superficie Erosionada (ΔEt)** para cada microcuena se obtuvo calculando primero el porcentaje de la superficie ocupada por la cárcava sobre el área total de cada microcuena en cada año del corte temporal: 1943, 1966, 1986, 1998 y 2000. Luego se calculó la diferencia entre el porcentaje del área que ocupaba cada cárcava entre 2000- 1943 para cada microcuena. El resultado se dividió entre cien para obtener una cifra que tuviera como valor máximo 1 a los efectos de poder proceder posteriormente al tratamiento estadístico de los resultados.

Cálculo de las variables morfométricas: Factor Forma, Índice de Circularidad y la Razón de Elongación **para cada microcuena** en cada corte temporal, a partir de las mediciones realizadas de las mismas.

Procesamiento estadístico de los resultados obtenidos de los cálculos morfométricos: Índice de Circularidad, Razón de Elongación y Factor Forma para cada microcuena y tipificación de las mismas agrupándolas según la probabilidad de que disipen o concentren energía erosiva. Se pudo así clasificar las microcuenas según la tendencia a la erodabilidad intrínseca a las mismas debido a su forma geométrica.

Cálculo de las variables morfométricas: Factor Forma, Índice de Circularidad y la Razón de Elongación **para cada cárcava** en cada corte temporal, a partir de las mediciones realizadas de las mismas.

Procesamiento estadístico de los resultados obtenidos de los cálculos morfométricos: Índice de Circularidad, 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. Se pudo así clasificar las cárcavas según la tendencia a la erodabilidad intrínseca a las mismas debido a su forma geométrica.

Cuantificación de las variables físicas para cada microcuenca usando la extensión Polygeom del programa Arc- View 3.2: pendiente media, densidad de la red de drenaje y coeficiente de rugosidad. Se organizó estadísticamente la información y se clasificaron las microcuencas en 4 tipos según la medida de dispersión intercuartílica que presentaron los resultados obtenidos.

Medición de los cambios acaecidos en los principales usos del suelo (incremento en la superficie forestada, modificaciones en el área de la superficie agrícola y extensión de la superficie de las praderas) en las microcuencas para cada corte temporal usando la extensión Polygeom del programa Arc- View 3.2.

Realización de intersección de las coberturas correspondientes a las cárcavas digitalizadas en cada corte temporal con las respectivas de usos del suelo **para medir los cambios producidos en el uso del suelo en las cárcavas (forestación).**

Salidas de campo para realizar chequeos y actualización de la información sobre el estado de las variables ambientales y geometría de las cárcavas.

Análisis factorial a partir de componentes principales, a los efectos de evaluar jerarquizadamente la incidencia de las variables morfométricas, físicas y antrópicas y asociarlas a la diferencia en el incremento en el área de la superficie de las cárcavas en cada una de las microcuencas (ΔEt). El análisis permitió arribar a una descripción sintética del conjunto de variables y su grado de asociación, a través de una combinación lineal de las primeras, que se denominan componentes principales.

Se partió de las siguientes premisas:

- Las variables seleccionadas para identificar los factores morfométricos, físicos y antrópicos tienen cierta jerarquía al momento de incidir en la dinámica morfológica de las microcuencas. (Hipótesis).
- Todas las variables tienen igualdad de oportunidades para incidir en el funcionamiento sistémico de las microcuencas.
- Las variables no están correlacionadas entre sí. (Hipótesis nula)

Realización de correlaciones para evaluar la relación de dependencia entre cada una de las variables morfométricas, físicas y antrópicas y la diferencia de incremento de la superficie de las cárcavas *para cada microcuenca* (ΔEt) y tener una comprensión de los procesos erosivos. Para analizar la significatividad de los valores de r obtenidos al efectuar la correlación entre las diferentes variables y la diferencia de incremento de la superficie de las cárcavas para cada microcuenca (ΔEt), se realizó una prueba t- student formulándose como estadístico:

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

Las hipótesis planteadas son que:

H₀- No existe relación entre las variables.

H₁- Las variables son dependientes.

Con un nivel de significación de $\alpha = 0,05$

Si $t_c > t_t$ - el valor de r es significativo

$t_c < t_t$ - el valor de r no es significativo

Clasificación de las cárcavas según los factores determinantes en los procesos de extensión horizontal de las mismas en microcuencas.

Análisis factorial a partir de componentes principales, a los efectos de evaluar jerarquizadamente la incidencia de las variables morfométricas, físicas y antrópicas en

la extensión de las cárcavas. El análisis permitió arribar a una descripción sintética del conjunto de variables y su grado de asociación, a través de una combinación lineal de las primeras, que se denominan componentes principales.

Se partió de las siguientes premisas:

- Las variables seleccionadas para identificar los factores morfométricos, físicos y antrópicos tienen cierta jerarquía al momento de incidir en la dinámica morfológica de las microcuencas. (Hipótesis).
- Todas las variables tienen igualdad de oportunidades para incidir en el funcionamiento sistémico de las microcuencas.

Las variables no están correlacionadas entre sí. (Hipótesis nula)

Realización de correlaciones para evaluar la relación de dependencia entre cada una de las variables morfométricas, físicas y antrópicas y la tasa de crecimiento absoluto de las cárcavas (TCA). Para analizar la significatividad de los valores de r obtenidos al efectuar la correlación entre las diferentes variables y la tasa de incremento del área de la superficie de las cárcavas (TCA) se realizó una prueba t- student formulándose como estadístico:

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

Las hipótesis planteadas son que:

H₀- No existe relación entre las variables.

H₁- Las variables son dependientes.

Con un nivel de significación de $\alpha = 0,05$

Si $t_c > t_r$ - el valor de r es significativo

$t_c < t_r$ - el valor de r no es significativo

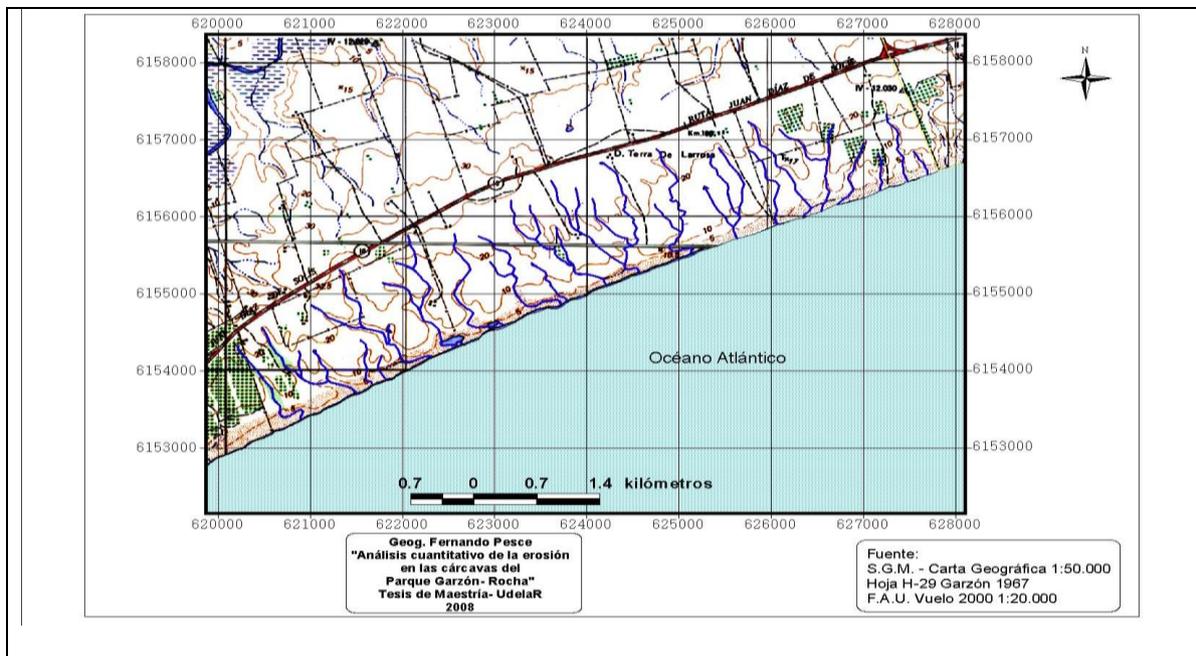
Clasificación de las cárcavas según los factores determinantes en los procesos de extensión horizontal de las mismas.

Esbozo de modelo interpretativo de la dinámica geomorfológica que incide en la extensión de las cárcavas.

VII- CARACTERIZACIÓN GEOGRÁFICA DEL ÁREA.

El Parque Lacustre Garzón se extiende entre los $-38^{\text{G}}47'$ y los $-38^{\text{G}}71'$ de latitud y entre los $60^{\text{G}}75'$ y los $60^{\text{G}}45'$ de longitud oeste. (Fig. 3)

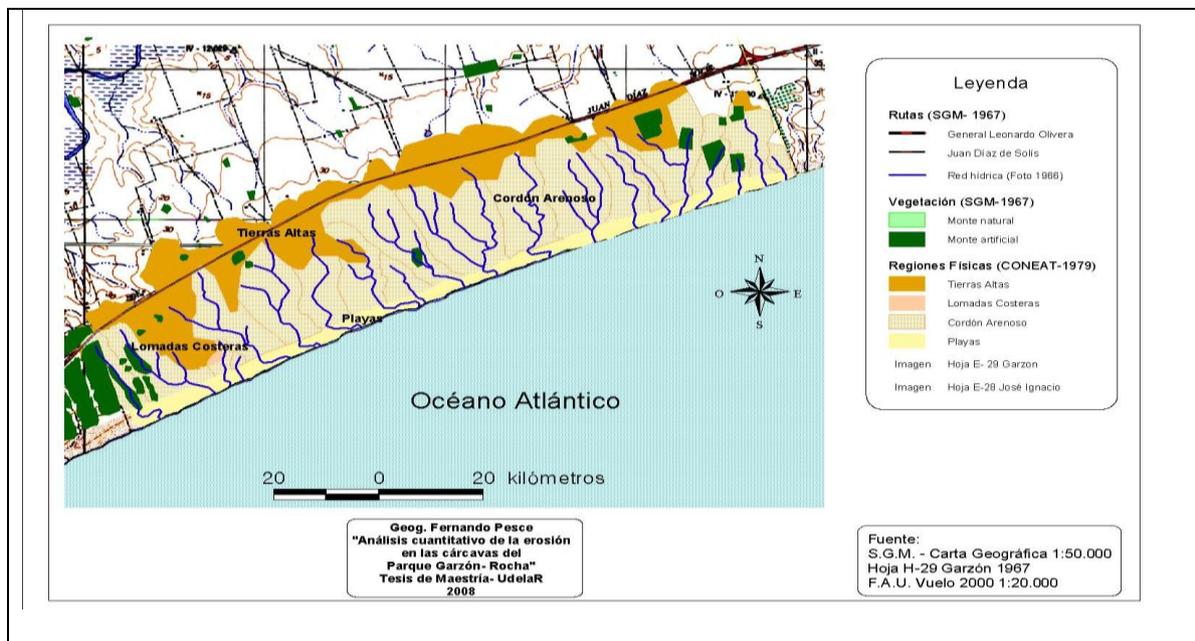
Figura N° 3. Emplazamiento del área de estudio: sur Ruta Nacional N° 10.



La situación astronómica en latitud, la ubicación geográfica al sureste del Uruguay en la fachada atlántica y en la llanura litoral oceánica, constituyen los principales factores ambientales del área. En términos generales el clima es subtropical húmedo con veranos cálidos, humedad relativa alta, intensa precipitación y evaporación, y presenta variaciones estacionales de temperatura bien acusadas y riesgo de sequías prolongadas¹⁸. La deficiencia hídrica estival genera condiciones de sequía para las pasturas y cultivos, mientras que desde el punto de vista hidrológico el escurrimiento en los ríos se concentra en los meses de invierno, principalmente en el mes de agosto¹⁹.

En el área de estudio pueden identificarse tres unidades paisajísticas (Fig. 4):

Figura 4. Regionalización física del área de estudio



Lomadas costeras

Estas geofomas se desarrollan entre las cotas de 10 a no más de 30 metros.

¹⁸ Corsi, W. (1978). Clima. En Pasturas IV. CIAAB. Miscelánea N° 18. p. 255-266.

¹⁹ Duran, A.; Norbis, W. (1997). Clima. En Reserva de Biosfera Bañados del Este. Avances del Plan Director. PROBIDES. p. 31-35.

El relieve es suavemente ondulado, con lomas aplanadas en su parte superior y con predominio de pendientes de 2 a 3% en las laderas en donde se desarrollan procesos severos de erosión en cárcavas.

El material geológico generador está constituido por sedimentos areno arcillosos de color pardo de origen cuaternario, recubiertas por arenas de data reciente.

Los suelos predominantes son de textura franco arenosa, con permeabilidad lenta, drenaje imperfecto y fertilidad natural muy baja, presentando diversos grados de erosión. Los factores limitantes para el uso antrópico son la baja fertilidad, la degradación de la estructura y el alto riesgo de erosión que los mismos presentan en pendientes moderadas.

El ecosistema predominante es de pradera psámofila de desarrollo estival de tapiz denso y algo abierto.

El uso del suelo en general es pecuario extensivo, aunque existen cultivos marginales estivales.

Cordón arenoso

Se extiende en altimetrías que oscilan entre los 10 y 20 metros. Los materiales geológicos generadores están constituidos por depósitos arenosos recientes sobre sedimentos limo- arcillosos de origen cuaternario.

Los suelos dominantes son de rápida permeabilidad y drenaje excesivo, de muy baja fertilidad, presentando gran riesgo de erosión de origen eólico.

Los ecosistemas predominantes son las comunidades psamófilas en las proximidades de la costa y la pradera de desarrollo estival de tapiz ordinario y algo abierto hacia el interior. Pueden presentarse depresiones, localizadas en las partes anti litorales de las dunas fijas, en las que se desarrollan esteros y humedales. La principal amenaza para la

conservación de esta formación vegetal la constituye la fijación de dunas por plantación de especies alóctonas como ser las acacias.

El uso del suelo es pecuario extensivo muy restringido y se han desarrollado cultivos forestales principalmente de pino marítimo y eucaliptos.

Playas

Este grupo corresponde a las arenas de edad actual no fijadas por vegetación y a los cordones litorales arenosos. El material geológico subyacente está integrado por sedimentos areno- arcillosos de origen cuaternario.

Esta unidad, se caracteriza por los procesos geomorfológicos dinámicos propios de la interfase hidrosfera/ atmósfera/ litosfera, propia de la zona litoral. La vegetación predominante está constituida por comunidades psamófilas poco densas (más del 50% del suelo descubierto). La principal actividad antrópica se asocia a la actividad turística estival.

De acuerdo a los datos del VII Censo General de Población, III de Hogares y V de Viviendas del 22 de mayo de 1996 residían en el área tan solo 25 habitantes e igual cantidad de se contó en el Censo de Población (Fase I) realizado en el año 2004. La densidad de población promedio dentro del área resultó ser de 1.4 hab. /km².

Del porcentaje total dedicado al sector primario, la mayoría de la población (48%) se dedicaba a la actividad pecuaria y a la silvicultura (Fig. 6).

La agricultura resulta ser una actividad económica marginal, con menos del 4% de las explotaciones dedicadas a la misma como rubro de principal ingreso y circunscribiéndose principalmente a cultivos de verano.

El sector terciario de la economía ocupaba a la población económicamente activa que desempeñaba actividades en la prestación de diferentes servicios. Es muy probable que desde la fecha de realización del último censo al momento actual, el peso porcentual de

la población económicamente activa en el sector secundario y terciario se haya incrementado, dado el gran impulso que ha tenido la construcción de mansiones con fines turísticos que se han edificado en la zona litoral oceánica.

En el área de estudio no existen grandes centros urbanos y los datos indican que el mercado inmobiliario está lejos de alcanzar niveles superiores o similares a Punta del Este.

Hasta este momento la zona no ha mostrado un desarrollo urbanístico relevante, sino que se encuentra bajo fuertes presiones de especulación aunque ésta no ha avanzado con la velocidad esperada, como consecuencia de la paralización de las obras de construcción del puente sobre la Laguna Garzón.

Al año 2008 figuraban en el sitio Web de la DINAMA distintas solicitudes de autorización ambiental para la realización de distintos proyectos urbanísticos- turísticos en la zona que reflejan el alto valor inmobiliario de los predios del Parque Lacustre Garzón.

Finalmente, el 16 de diciembre del año 2008, el estado uruguayo aprobó la construcción del puente sobre la laguna Garzón a los efectos de dar continuidad a la Ruta N° 10.

Las obras se llevarán a cabo por una empresa particular en convenio entre el MTOP, la Intendencia Municipal de Maldonado y la Intendencia Municipal de Rocha.

Esta decisión política sin dudas tendrá relevantes impactos ambientales en el área de estudio, ya que la misma quedará físicamente articulada al principal corredor turístico del país a través de la Ruta N° 10, que se interpone entre la laguna y el mar.

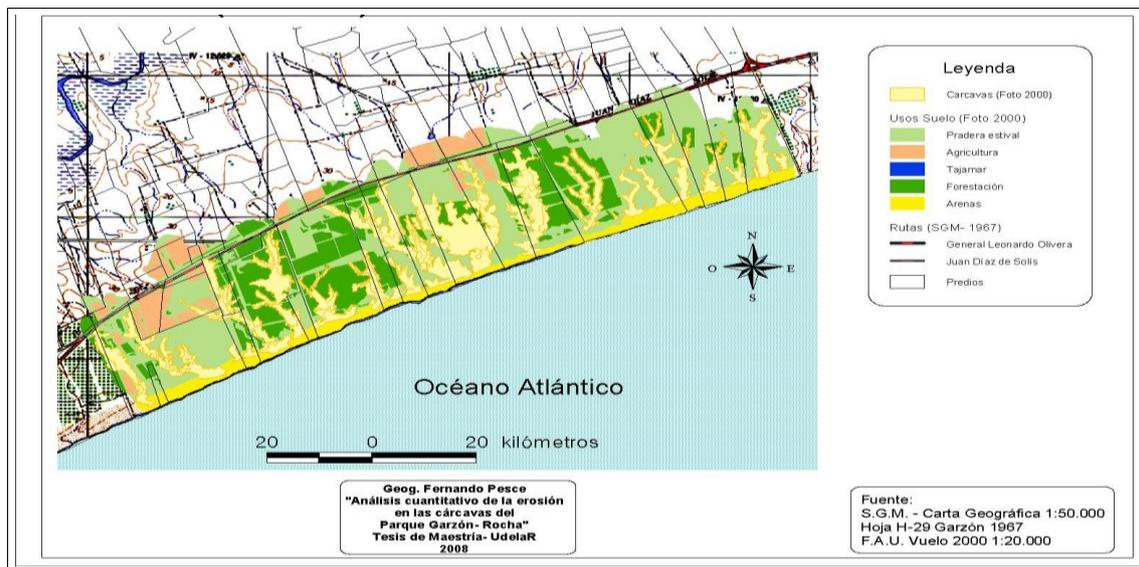
La construcción de la ruta provocó modificaciones ambientales en el paisaje geográfico, ya que se construyó una divisoria de aguas artificial que alteró el sistema de drenaje.

En Uruguay, dentro de las causas antrópicas vinculadas a la génesis y desarrollo de las cárcavas, se encuentra la construcción inadecuada de la red vial; debido a la red de

drenaje vial, tanto interna de los predios como pública, se inician procesos de erosión en banquetas inadecuadas con descargas en sitios críticos. (Sganga, op.cit)

Esta ruta es un importante eje vial turístico que, potenciado con la construcción del puente que permitirá el cruce sobre la laguna, facilitará el acceso vehicular masivo a todos los balnearios, y la eventual valorización de los emprendimientos inmobiliarios. Sin dudas la construcción del puente ha de provocar un efecto catalizador al desarrollo inmobiliario descontrolado con sus impactos ambientales sobre el área, que ya presenta un escenario de vulnerabilidad ambiental. Son múltiples las características geográficas que convierten el área de estudio en un escenario de alta vulnerabilidad ambiental, vale decir, en el que se dan condiciones que, en interacción compleja, actúan favoreciendo el desarrollo de la erosión y la extensión de las cárcavas.

Figura 5. Área de estudio: principales usos del suelo (2000)



La interrelación de un relieve de lomadas costeras con desniveles topográficos de hasta 30 metros, sobre una estructura geológica sedimentaria con una secuencia estratigráfica de materiales con diferencias en texturas friables, sobre la que se desarrollan suelos con baja fertilidad y estructuras con alto riesgo de erosión, con un ecosistema de pradera estival, serían los factores físicos ambientales que sumarían para explicar la erodabilidad del territorio.

A su vez, las máximas condiciones de erosividad se encuentran en la dinámica de las precipitaciones y la evapotranspiración, que favorecen una concentración temporal en el mes de agosto de las condiciones para los procesos erosivos incidentes en el desarrollo de las cárcavas.

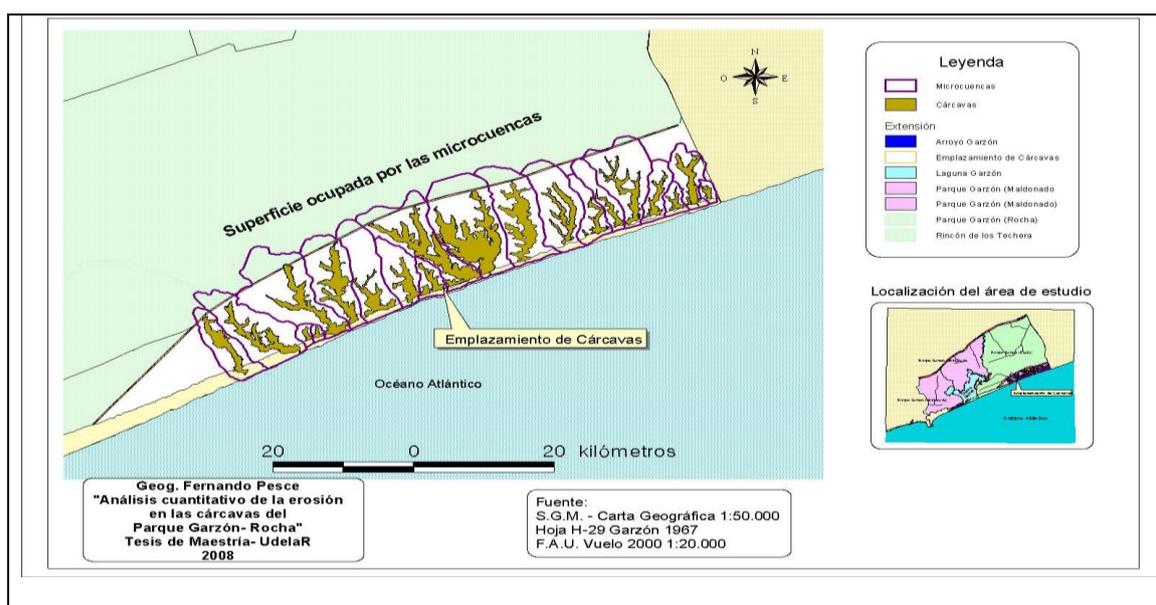
Por último, la actividad pecuaria con tendencia histórica al sobre pastoreo (dada la baja capacidad de carga ecosistémica), se ha sumado a la erodabilidad física para contribuir a la vulnerabilidad ambiental.

VIII. RESULTADOS

VIII.1. RESULTADOS A ESCALA DE MICROCUENCAS

La secuencia geográfica de 22 cárcavas queda circunscripta a 20 microcuencas que las contienen y que ocupan 1384 hectáreas (Anexo 2). Hay 2 pequeñas cárcavas (las N° 9 y 20) que se encuentran adicionadas a macro cárcavas, extendiéndose dentro de las mismas microcuencas que las cárcavas contiguas (Fig. 6) .

Figura 6- Serie de microcuencas en las que se inscriben las cárcavas en estudio



Entre los años 1943- 2000 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 microcuena (ΔEt).

VIII.1.A. Incremento en el área erosionada (ΔEt)

Los resultados obtenidos del cálculo de (ΔEt) fueron los siguientes:

Tabla N° II- Porcentaje de la superficie ocupada por las cárcavas en las microcuencas para cada corte temporal y diferencia entre la superficie final e inicial sobre base 1. (ΔEt)

	1943	1966	1986	1998	2000	ΔEt
Microcuenca	% erosión					
1	15,92	22,91	27,05	27,71	32,46	0,17
2	13,24	16,48	17,08	17,60	21,29	0,08
3	12,66	14,37	14,66	14,70	15,12	0,02
4	15,58	19,17	27,36	28,03	35,65	0,20
5	10,32	11,58	14,78	15,08	17,55	0,07
6	14,78	18,80	22,27	23,54	25,04	0,10
7	8,36	11,47	12,33	13,98	16,21	0,08
8	10,29	13,46	14,29	14,79	17,91	0,08
9	24,83	44,10	32,13	37,07	39,62	0,15
10	35,39	39,40	40,16	40,44	42,32	0,07
11	27,15	31,61	32,19	32,74	38,11	0,11
12	26,31	27,44	28,61	30,78	30,87	0,05
13	9,47	11,60	13,29	15,85	16,64	0,07
14	7,80	11,66	12,56	12,60	14,05	0,06
15	11,41	13,95	14,59	14,86	15,80	0,04
16	13,34	15,10	15,63	16,23	16,87	0,04
17	9,99	16,75	18,24	20,09	21,55	0,12
18	10,83	18,68	20,16	21,98	23,67	0,13
19	20,15	27,67	29,39	30,10	31,20	0,11
20	13,64	21,87	21,95	24,18	24,51	0,11

La máxima diferencia en el incremento de la superficie erosionada con respecto al total del área de la superficie de cada microcuenca fue del 20% y la mínima diferencia de extensión fue del 2%. De acuerdo a estos valores, el resultado de la media geométrica de los mismos es del 8%, que se consideró como medida de agrupamiento de los resultados para efectuar una tipología primaria de las microcuencas según si el área de la superficie erosionada en cada una de ellas coincidía, superaba o era inferior al valor de la media.

Tipo I- aquellas en las que el porcentaje de incremento del área de la superficie ocupada por las cárcavas fue inferior al 8% del área de la superficie total de cada microcuenca, valor éste coincidente con la media. Ocupan esta clase 9 cárcavas, que representan el 45% del total.

Tipo II- aquellas microcuencas en las que el porcentaje del área de la superficie de las cárcavas se incrementó un 8% sobre la superficie total coincidiendo con el incremento medio y son 3 microcuencas que representan el 15%.

Tipo III- corresponden al 40% del total de las microcuencas, y son aquellas en las que el porcentaje de incremento del área ocupada por las cárcavas sobre el área total supera el valor medio para el total de los datos y que es superior al 8%.

VIII.1.b. FACTOR MORFOMÉTRICO EN LAS MICROCUENCAS (Anexo 3)

Los resultados obtenidos al medir las variables seleccionadas para cuantificar el factor morfométrico fueron:

Tabla N° III. Microcuencas: variables morfométricas

Microcuenca	I. Circularidad	R. Elongación	F. Forma	Δet
1	0,41	0,52	0,21	0,17
2	0,47	0,62	0,3	0,08
3	0,58	0,64	0,32	0,02
4	0,67	0,64	0,32	0,2
6	0,42	0,65	0,32	0,07
5	0,55	0,64	0,32	0,1
7	0,46	0,55	0,24	0,08
8	0,53	0,65	0,33	0,08
9	0,45	0,62	0,3	0,15
10	0,40	0,57	0,25	0,07
11	0,72	0,74	0,43	0,11
12	0,47	0,60	0,29	0,05
13	0,62	0,67	0,35	0,07
14	0,44	0,56	0,25	0,06
15	0,31	0,41	0,13	0,04
16	0,57	0,64	0,32	0,04
17	0,47	0,58	0,27	0,12
18	0,60	0,76	0,45	0,13
19	0,44	0,58	0,27	0,11
20	0,60	0,64	0,32	0,11

Según (Soczynska, op.cit), si el **Factor Forma** se comporta como:

F. Forma > 0,5- Tendencia a la circularidad y a la concentración de energía

F. Forma < 0,5- Tendencia a la elongación y a la disipación de energía

Por lo que n = 20 microcuencas poseen Factor Forma < 0,5.

Según Schumm (op.cit) si la **Razón de Elongación** 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

Por lo que n= 19 microcuencas poseen Razón de Elongación > 0,5.

Según Miller (op.cit) si el **Índice de Circularidad** se comporta como::

I.C > 0,5 la microcuena tiende a la circularidad y a concentrar energía

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

Por lo que n = 9 microcuencas poseen Índice de Circularidad > 0,5.

VIII.1.c. FACTOR FÍSICO EN LAS MICROCUENCAS (Anexo 4)

La medición de las variables indicativas del factor físico dio como resultado:

Tabla	Nº	IV.	Microcuencas:	variables	físicas
Microcuena	Jerarquía Strahler Nº orden /10	PM	Densidad Red	Rugosidad	
1	0,10	0,03	0,03	0,11	
2	0,70	0,04	0,02	0,07	
3	0,10	0,03	0,05	0,19	
4	0,10	0,05	0,07	0,36	
5	0,70	0,03	0,02	0,06	
6	0,70	0,03	0,02	0,08	
7	0,10	0,03	0,02	0,06	
8	0,40	0,02	0,02	0,04	
8	0,40	0,04	0,05	0,22	
10	0,70	0,03	0,03	0,09	
11	1,00	0,02	0,03	0,06	
12	0,40	0,02	0,02	0,06	
13	0,50	0,02	0,03	0,04	
14	0,10	0,02	0,03	0,06	
15	0,50	0,03	0,05	0,15	
16	0,40	0,03	0,02	0,06	
17	0,10	0,04	0,02	0,10	
18	0,10	0,05	0,03	0,16	
19	0,10	0,05	0,02	0,10	
20	0,10	0,05	0,04	0,18	

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.

VIII.1.d. FACTOR ANTRÓPICO EN LAS MICROCUENCAS (Anexo 5)

Las variables antrópicas que se consideraron fueron el incremento del área forestal, las modificaciones en el área de la superficie agrícola y la contracción de los ecosistemas de pradera.

Para la variable FORESTACIÓN se consideró el porcentaje del área forestada (% superficie forestada) y antigüedad de la actividad (en años según vuelos aéreos).

Luego de realizar la sumatoria de las variables para cada microcuenca se las volvió a tipificar en rangos a los efectos de comparar con los valores asignados también en rangos para la variable erodabilidad obtenida en las variables morfométricas.

Tabla N° V- Microcuencas: usos del suelo

Variables antrópicas	Forestación	Rango	Rangos	% Sup. Forestada
Forestación	Δ % Sup.	1 a 4	1	0 a 9%
			2	10 a 19
			3	20 a 39
			4	> 39
	Antigüedad	1 a 5	Rangos	Años
	años		5	34
			4	24
			3	2
1		1		
Agricultura	Agricultura	1 a 3	Rangos	Periodos cultivados
	Periodos de actividad		1	0
			2	1 a 3
			3	4
Pradera	Pradera		Rangos	Δ % Sup.
	Δ % sup.	1 a 4	1	0 a 9
			2	9,1 a 19,5
			3	19,6 a 38,5
			4	> 38,6

Tabla N° VI. Tipología de microcuencas según integración de variables antrópicas referidas a cambios en usos del suelo entre 1943- 2000

Tipo	Categorías
Tipo I	4 a 7
Tipo II	8 a 11
Tipo III	12 a 15

Tabla N° VII. Tipificación de microcuencas según la integración de variables antrópicas (usos del suelo: variación superficial y temporal, 1943- 2000)

Microcuencas	Forestación		Agricultura	Pradera	Σ Variables	Tipos
	Δ % sup.	Antigüedad	Δ Temporal	Δ % sup.		
1	4	5	3	3	15	III
2	2	3	3	2	10	II
3	1	1	1	1	4	I
4	3	2	1	4	10	II
5	3	3	3	4	13	III
6	4	4	3	4	15	III
7	4	4	3	4	15	III
8	4	4	1	4	13	III
9	2	3	1	3	9	II
10	3	3	3	3	12	III
11	3	3	3	3	12	I I
12	3	4	2	3	12	III
13	4	4	2	4	14	III
14	2	4	2	2	10	II
15	1	1	2	1	5	I
16	2	5	2	2	11	III
17	2	5	1	2	10	II
18	2	5	1	3	11	III
19	1	1	1	2	5	I
20	1	1	1	2	5	I

De acuerdo a la tabla anterior, se obtuvieron los siguientes resultados:

Tipo I- En esta categoría los cambios en el uso del suelo en las microcuencas no experimentaron variaciones significativas a lo largo del período. Se ubicaron en este rango 7 microcuencas, que representan el 35% del total.

Tipo II- Esta categoría está abarcando a aquellas microcuencas en las que las variaciones en el uso del suelo fueron significativas en algún tramo temporal del período estudiado y abarcaron un área significativa. En esta categoría se ubican 5 de las microcuencas, representando el 25% del área.

Tipo III- Dentro de este tipo se ubican 11 microcuencas, que significan el 55% del total de las mismas y son aquellas en las que las modificaciones antrópicas en los usos del suelo considerados se sucedieron en forma continua y de manera significativa a lo largo del período considerado.

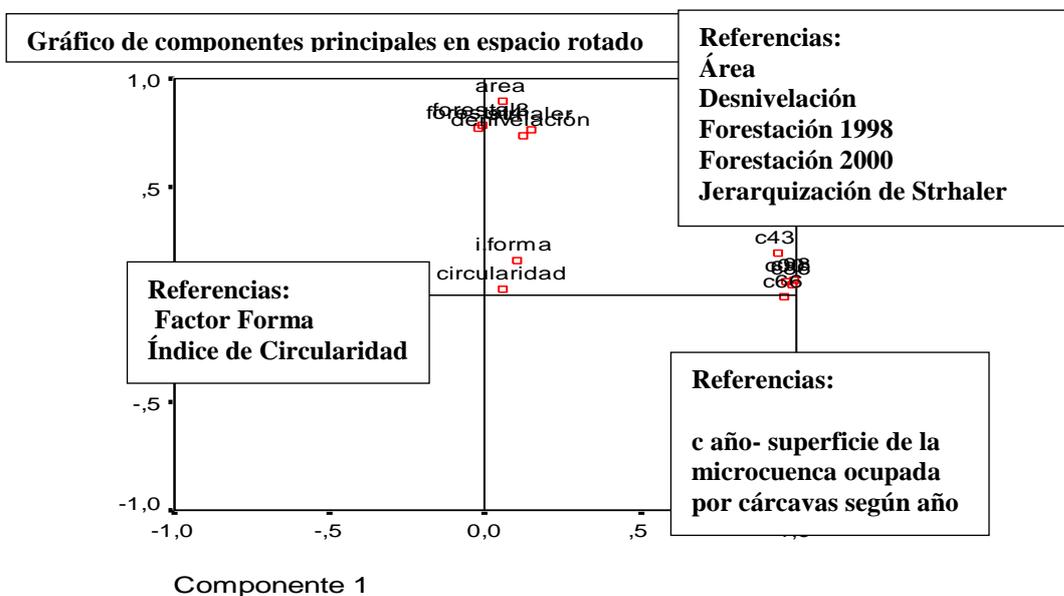
VIII.1.e. ANÁLISIS de COMPONENTES PRINCIPALES (Anexo 6)

Al efectuar el **análisis de componentes principales** a los efectos de integrar el conjunto de las **variables morfométricas, físicas y antrópicas** y asociarlas a la diferencia en el incremento en el área de la superficie de las cárcavas en cada una de las microcuencas (ΔE_t) los resultados fueron:

Tabla N° VIII. Microcuencas: asociación estadística de variables morfométricas, físicas y antrópicas con el incremento de la extensión de cárcavas. Medida de adecuación muestral KMO y prueba de Bartlett

Medida de adecuación muestral de Kaiser-Meyer-Olkin.		,505
Prueba de esfericidad de Bartlett	Chi-cuadrado aproximado	340,029
	gl	66
	Sig.	,000

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 muestra que dos variables explican en 67% de la dinámica del sistema geomorfológico a escala de microcuencas.**



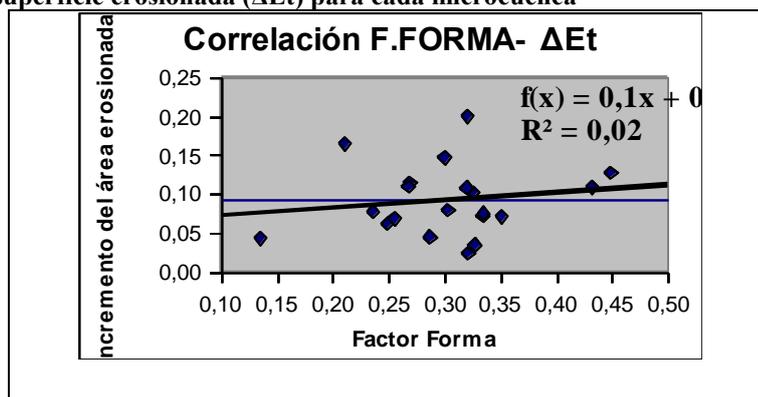
VIII.1.F. CORRELACIÓN ENTRE VARIABLES

Los resultados de la CORRELACIÓN entre la intensidad de dependencia entre la variación del área de la superficie de las cárcavas en las microcuencas (ΔEt) con las variables morfométricas, físicas y antrópicas para explicar la dinámica geomorfológica en las microcuencas resultaron ser:

VIII.1.f.a. VARIABLES MORFOMÉTRICAS

- La relación de dependencia entre la variable morfométrica Factor Forma y la variación en el incremento del área de la superficie erosionada en cada microcuenca resultó:

Figura 7- Gráfico de correlación entre la variable morfométrica Factor Forma y la variación del área de la superficie erosionada (ΔEt) para cada microcuenca



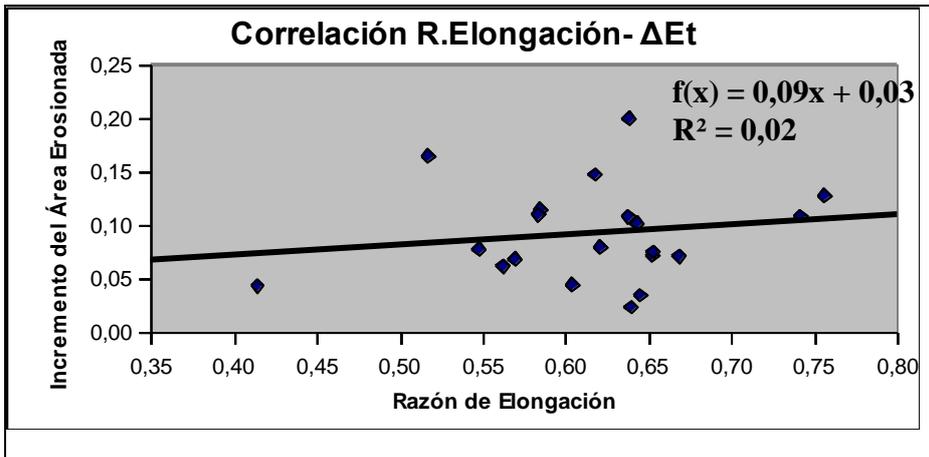
Para $n=20$, con $v=18$, $\alpha=0,05$, $t_c=1,71$ y $t_t=2,10$ y Dado que $1,71 < 2,10$, **r no es**

significativo entonces las variables F. Forma y (ΔEt) no serían dependientes

aceptándose H_0 .

- La relación de dependencia entre la variable morfométrica Razón de Elongación y la variación en el incremento del área de la superficie erosionada (ΔEt) en cada microcuenca resultó:

Figura 8- Gráfico de correlación entre la variable morfométrica Relación de Elongación y la variación del área de la superficie erosionada (ΔEt) para cada microcuenca.

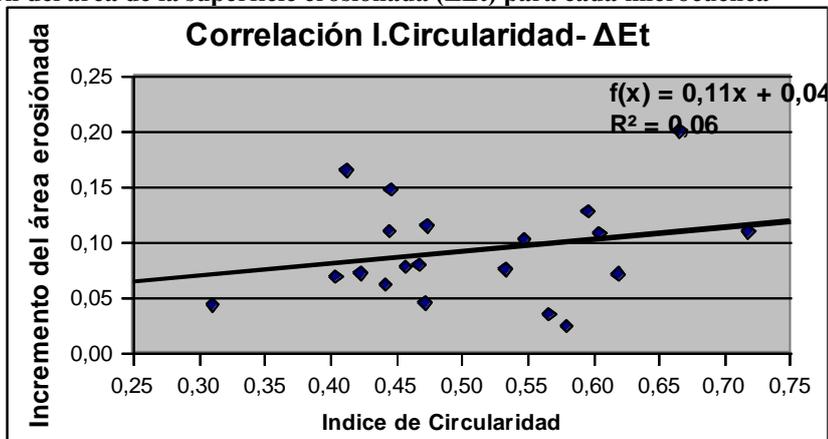


Para $n=20$, con $v=18$, $\alpha=0,05$, $t_c=1,72$ y $t_t=2,10$

Dado que $1,72 < 2,10$, r no es significativo entonces las variables **R. Elongación** y **(ΔEt)** **no serían dependientes** aceptándose H_0 .

- La relación de dependencia entre Índice de Circularidad y (ΔEt) resultó:

Figura 9- Gráfico de correlación entre la variable morfométrica Índice de Circularidad y la variación del área de la superficie erosionada (ΔEt) para cada microcuena

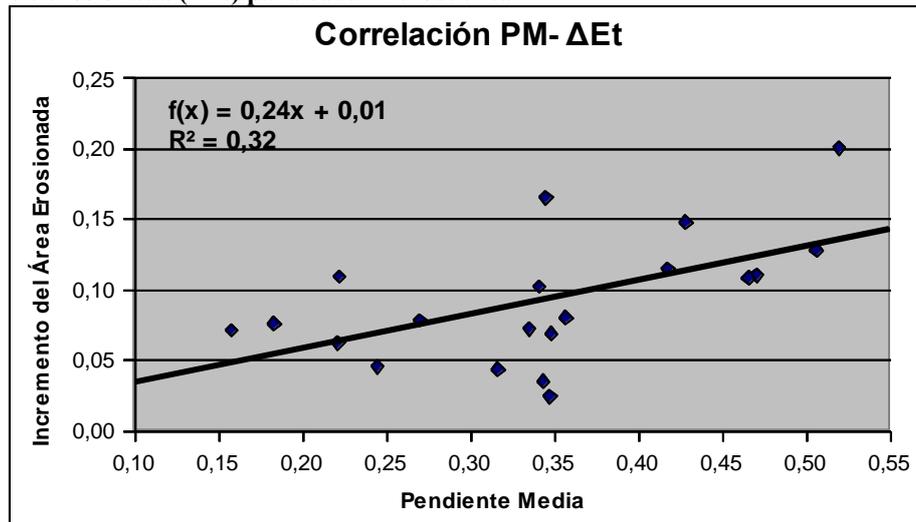


Para $n=20$, con $v=18$, $\alpha=0,05$, $t_c=2,14$ y $t_t=2,10$ y dado que $2,14 > 2,10$, r es significativo entonces las variables **I. Circularidad** y **(ΔEt)** se podrían considerar **dependientes** aceptándose H_1 .

VIII.1.f. b. VARIABLES FÍSICAS

- La relación de dependencia entre la Pendiente Media y (ΔEt) resultó:

Figura 10- Gráfico de correlación entre la variable física Pendiente Media y la variación del área de la superficie erosionada (ΔEt) para cada microcuenca

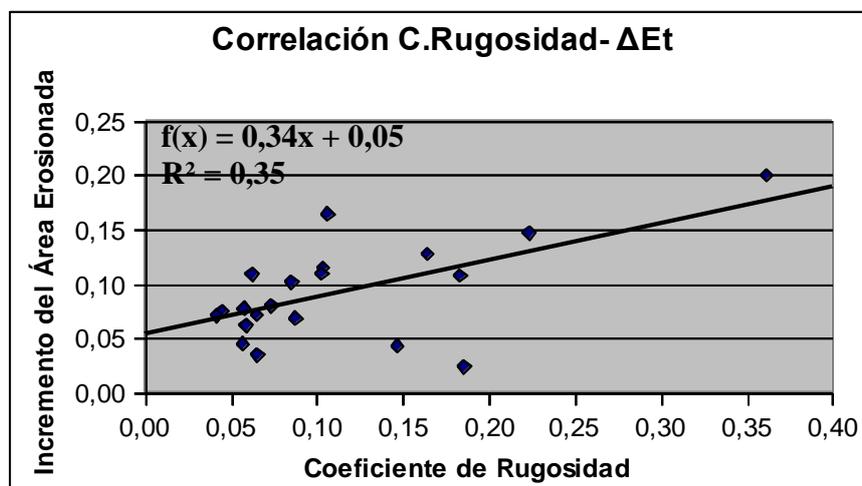


Para $n=20$, con $v=18$, $\alpha=0,05$, $t_c=3,71$ y $t_t=2,10$ y dado que $3,71 > 2,10$, r es

significativo entonces las variables Pendiente Media y (ΔEt) estarían guardando relación de **dependencia** aceptándose H_1 .

- La relación de dependencia entre Coeficiente de Rugosidad y (ΔEt) resultó:

Figura 11- Gráfico de correlación entre la variable física Coeficiente de Rugosidad y la variación del área de la superficie erosionada (ΔEt) para cada microcuenca

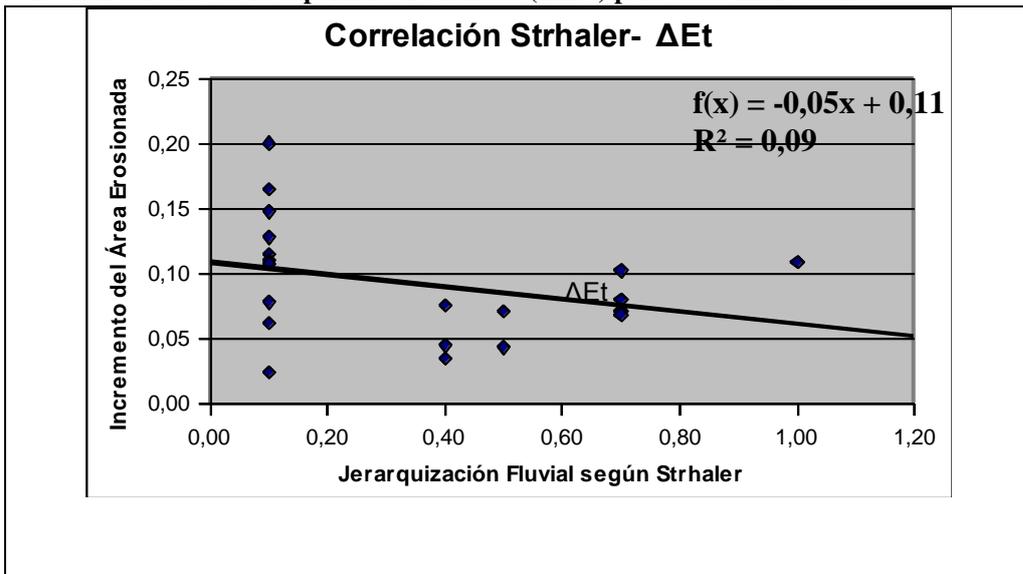


Para $n=20$, con $v=18$, $\alpha=0,05$, $t_c=4,01$ y $t_t=2,10$

Dado que $4,01 > 2,10$, r es significativo entonces las variables Coeficiente de Rugosidad y (ΔEt) serían dependientes aceptándose H_1 .

- La relación de dependencia entre Jerarquización de Strhaler y (ΔEt) resultó:

Figura 12- Gráfico de correlación entre la variable física Jerarquización Fluvial según Strahler y la variación del área de la superficie erosionada (ΔEt) para cada microcuenca

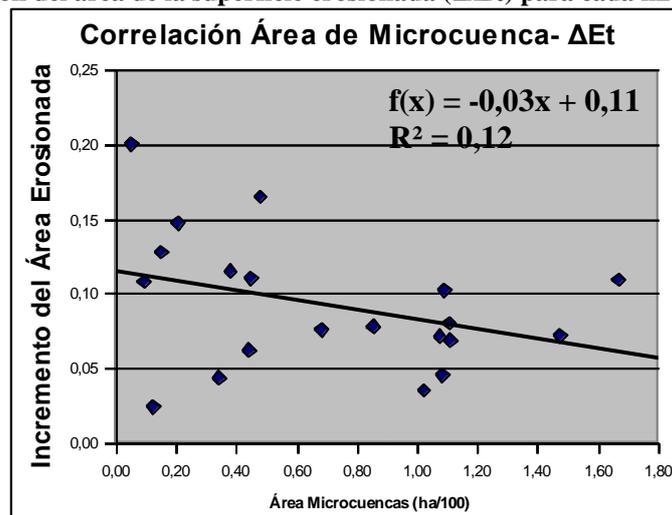


Para $n=20$, con $v=18$, $\alpha=0,05$, $t_c=2,49$ y $t_t=2,10$

Dado que $2,49 > 2,10$, r es significativo entonces las variables Jerarquización Fluvial según Strhaler y (ΔEt) serían dependientes aceptándose H_1 .

- La relación de dependencia entre Área y (ΔEt) en cada microcuenca resultó:

Figura 13- Gráfico de correlación entre la variable física Área de las microcuencas (expresada en ha/100) y la variación del área de la superficie erosionada (ΔEt) para cada microcuenca



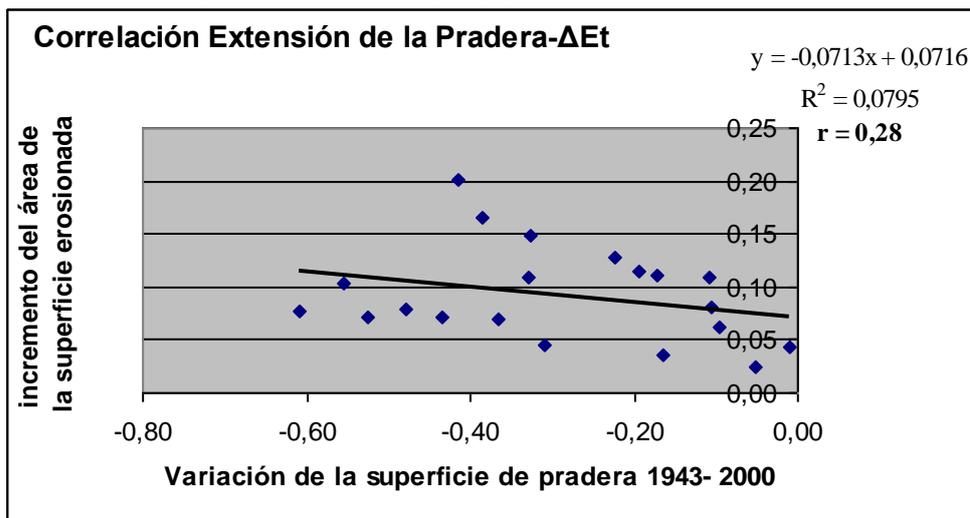
Para $n=20$, con $v=18$, $\alpha=0,05$, $t_c=2,69$ y $t_t=2,10$ y Dado que $2,69 > 2,10$, r es

significativo entonces las variables área de las microcuencas y (ΔEt) podrían ser dependientes aceptándose H_1 .

VIII.1.f. c. VARIABLES ANTRÓPICAS

- La relación de dependencia entre cambios en la pradera y (ΔEt) resultó:

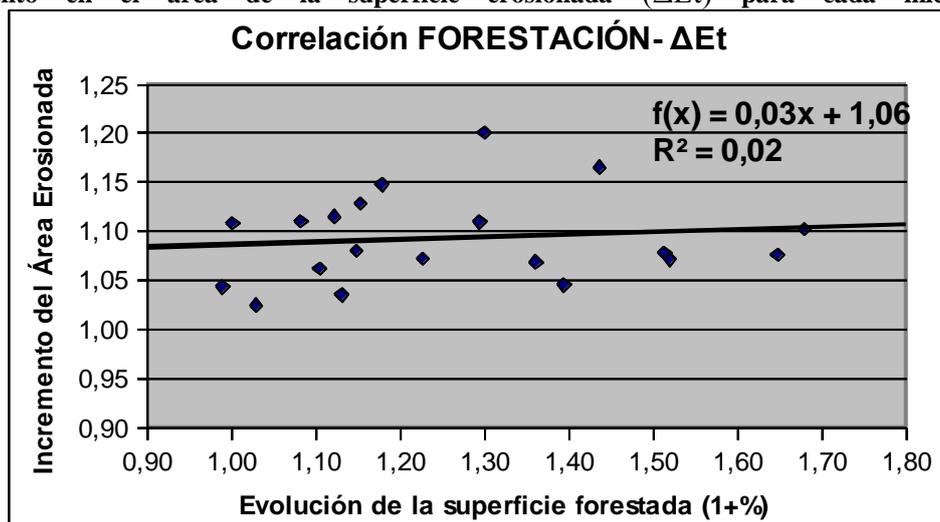
Figura 14- Gráfico de correlación entre la evolución de la praderas y la variación en el incremento en el área de la superficie erosionada (ΔEt) para cada microcuenca



Para $n= 20$, con $v=18$, $\alpha= 0,05$, $t_c= 2,64$ y $t_t= 2,10$ y dado que $2,64 > 2,10$, **r es significativo** entonces **las variables serían dependientes** aceptándose H_1 .

- La relación de dependencia entre evolución de la forestación y (ΔEt) resultó:

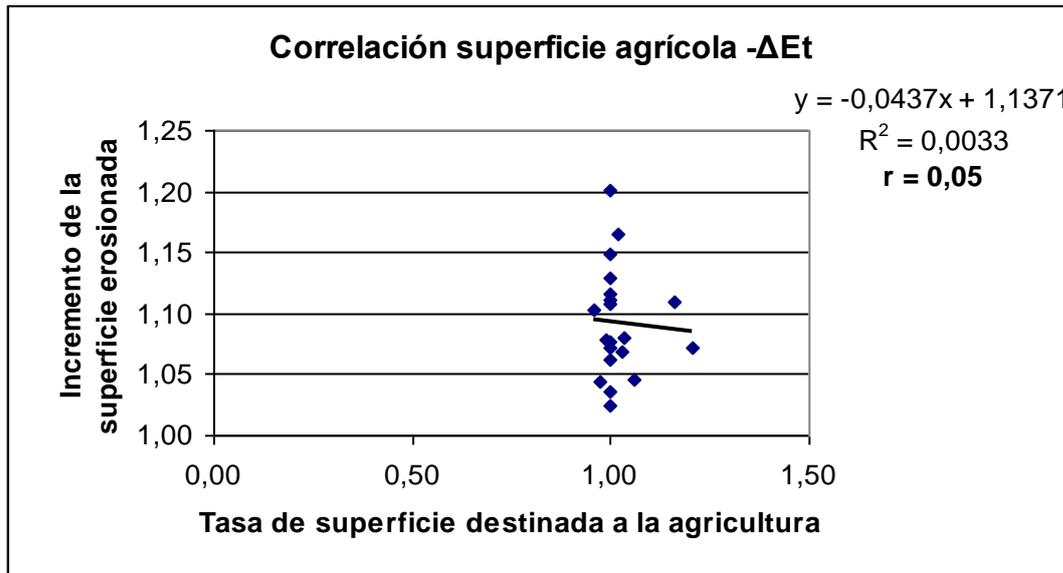
Figura 15- Gráfico de correlación entre la evolución de la superficie forestada y la variación en el incremento en el área de la superficie erosionada (ΔEt) para cada microcuenca



Para $n= 20$, con $v=18$, $\alpha= 0,05$, $t_c= 1,56$ y $t_t= 2,10$ y dado que $1,56 < 2,10$, **r no es significativo** entonces **las variables evolución de la superficie forestada y el incremento de la superficie erosionada en las microcuencas (ΔEt) tendrían comportamiento independientes**, aceptándose H_0 .

- La relación de dependencia entre evolución de la superficie agrícola y (ΔEt) resultó:

Figura 16- Gráfico de correlación entre la evolución de la superficie agrícola y la variación en el incremento en el área de la superficie de las cárcavas (ΔEt) para cada microcuenca ara cada microcuenca



Para $n= 20$, con $v=18$, $\alpha= 0,05$, $t_c= 0,95$ y $t_t= 2,10$

Dado que $0,95 < 2,10$, **r no es significativo** entonces **las variables evolución de la superficie agrícola y el incremento de la superficie erosionada en las microcuencas (ΔEt) serían independientes** aceptándose H_0 .

Tabla N° IX- Síntesis de los resultados obtenidos al correlacionar linealmente las variables morfométricas, físicas y antrópicas con el incremento del área de la superficie de las cárcavas

FACTORES	VARIABLES	Correlación entre variables e incremento de las cárcavas
MORFOMÉTRICOS	I. Circularidad	R = 0,24 tc (2,14) > tt (2,10)
	R. Elongación	R = 0,16 tc (1,71) < tt (2,10)
	F. Forma	R = 0,16 tc (1,72) < tt (2,10)
FÍSICOS	Área	R = 0,35 tc (2,69) > tt (2,10)
	Jerarquía Fluvial	R = 0,31 tc (2,49) > tt (2,10)
	C. Rugosidad	R = 0,60 tc (4,01) > tt (2,10)
	Pendiente Media	R = 0,52 tc (3,71) > tt (2,10)
ANTRÓPICOS	Uso Forestal	R = 0,12 tc (1,56) < tt (2,10)
	Agricultura	R = 0,05 tc (0,95) < tt (2,10)
	Pradera	R = 0,28 tc (2,64) > tt (2,10)

Una vez realizado el análisis cuantitativo del incremento del área de la superficie de las cárcavas a escala de las microcuencas, luego de haber analizado la relación de dependencia del fenómeno geomorfológico con variables seleccionadas para describir

los factores morfométricos, físicos y antrópicos, es que se procedió a considerar a las propias cárcavas como objeto de interpretación.

RESULTADOS A ESCALA DE CÁRCAVAS

VIII.2.a Cálculo de la tasa de crecimiento de las cárcavas entre 1943- 2000

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 1943- 2000 resultó:

Tabla N° X- Evolución de la superficie de las cárcavas y cálculo del TCA.

CÁRCAVA	AREA 43	AREA 66	AREA 86	AREA 98	AREA 00	TCA
1	75864,36	109047,84	128943,77	132106,21	154745,82	1,04
2	146026,91	181696,43	188320,93	194110,59	234802,07	0,61
3	15326,47	17361,51	17749,78	17845,78	18334,33	0,20
4	7558,76	9309,41	13276,15	13586,95	17301,58	1,29
5	151838,53	170378,25	217556,82	222050,07	258304,36	0,70
6	160718,49	204482,28	242278,13	256016,70	272419,11	0,70
7	71299,23	97764,71	105096,72	119215,39	138281,13	0,94
8	70045,86	91590,39	97296,42	100757,38	121960,33	0,74
9	9883,80	12471,88	14464,23	17330,86	18619,09	0,88
10	40617,31	47460,40	50885,23	58127,65	62058,81	0,53
11	392522,92	437064,28	445450,12	448606,17	469488,49	0,20
12	452221,50	526630,85	536286,51	0,00	634972,78	0,40
13	284356,33	296581,44	309216,45	332671,55	333768,44	0,17
14	101638,59	124538,79	142620,10	170779,46	178570,22	0,76
15	34319,12	51265,93	55253,57	55451,83	61854,21	0,80
16	38691,68	47346,16	49483,41	50378,12	53688,78	0,39
17	136152,74	154101,43	159488,69	161657,49	172245,72	0,27
18	37761,29	63306,87	68928,37	75877,35	81472,66	1,16
19	16061,27	27723,17	29905,00	32593,56	35190,68	1,19
20	2289,91	4234,98	4635,98	5805,80	5822,24	1,54
21	87379,96	118976,82	126240,32	128055,09	133113,31	0,52
22	12414,87	19949,40	19977,17	21923,31	22369,27	0,80

- El análisis cuantitativo del proceso de erosión en las cárcavas tuvo como finalidad interpretar las variables que inciden directamente en el crecimiento del área de la superficie de las mismas. Para ello, la Tasa de Crecimiento Absoluto (TCA) determinada para cada cárcava, se correlacionó con las variables seleccionadas para definir el conjunto de los factores intervinientes en el proceso de erosión.

Dentro de los **factores morfométricos** se consideraron las variables factor forma, índice de circularidad y razón de elongación.

Para los **factores físicos** se consideraron como variables el desnivel, la jerarquización fluvial de Strahler, el coeficiente de rugosidad; y como **factor antrópico** se consideró la extensión de las áreas forestadas dentro de cada cárcava.

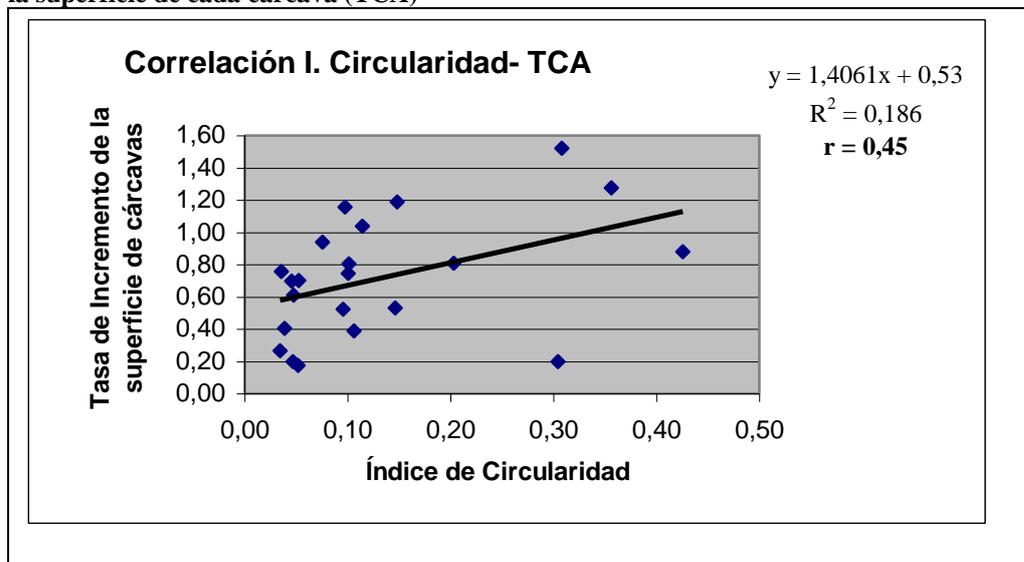
VIII.2.b. VARIABLES MORFOMÉTRICAS

Tabla N° XI. Tasa de Incremento Absoluto del área de la superficie de las Cárcavas (TCA) y las variables morfométricas de las cárcavas

CARCAVA	TCA	Circularidad	Elongación	Forma
1	1,04	0,11	0,34	0,24
2	0,61	0,05	0,37	0,19
3	0,20	0,30	0,56	0,20
4	1,28	0,36	0,60	0,48
5	0,70	0,05	0,34	0,24
6	0,70	0,05	0,35	0,24
7	0,94	0,08	0,44	0,33
8	0,74	0,10	0,41	0,32
9	0,88	0,43	0,69	0,51
10	0,53	0,15	0,47	0,32
11	0,20	0,05	0,39	0,17
12	0,40	0,04	0,54	0,24
13	0,17	0,05	0,42	0,17
14	0,76	0,04	0,37	0,28
15	0,80	0,10	0,38	0,37
16	0,39	0,11	0,34	0,27
17	0,26	0,03	0,34	0,19
18	1,16	0,10	0,36	0,43
19	1,19	0,15	0,47	0,50
20	1,52	0,31	0,56	0,68
21	0,52	0,10	0,40	0,33
22	0,81	0,20	0,62	0,50

Para la variable Índice de Circularidad se obtuvo que:

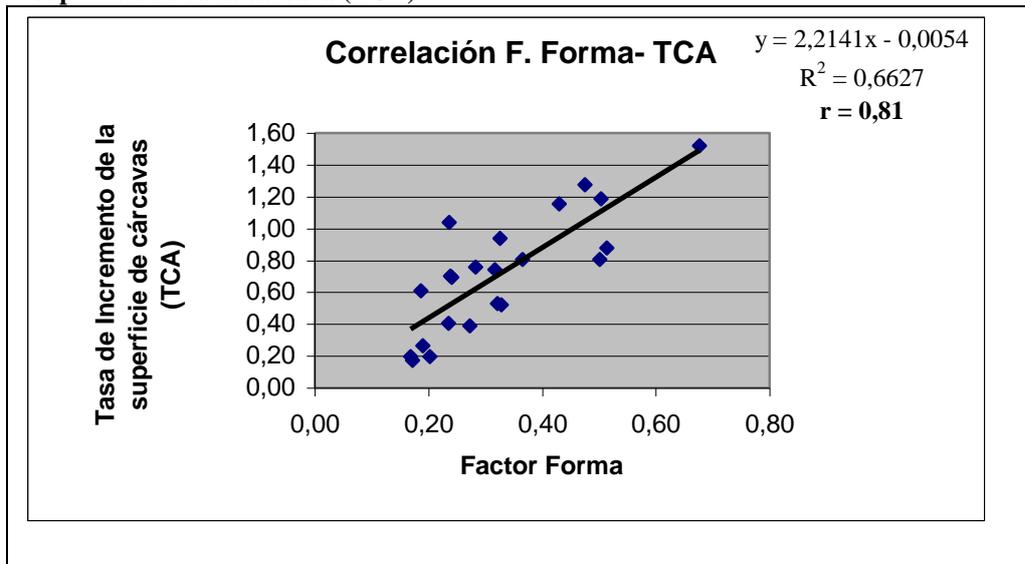
Figura 17- Gráfico del grado de relación entre el Índice de Circularidad y la Tasa de Incremento de la superficie de cada cárcava (TCA)



Para $n = 22$, $v = 20$, $t_c(3,32)$. Dado que el valor de $t_c(3,32) > t_t(2,086)$ resulta ser significativo por lo que podría considerarse de que existiría relación entre las variables, aceptándose H_1 .

Con respecto al **Factor Forma**:

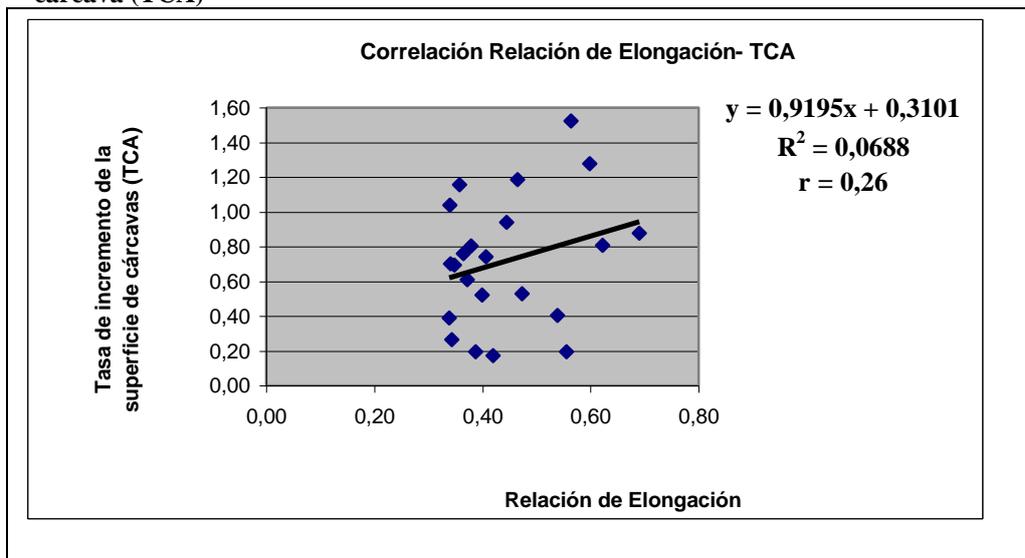
Figura 18- Gráfico del grado de relación entre el Factor Forma y la Tasa de Incremento de la superficie de cada cárcava (TCA)



Para $n=22$, $v=20$, $t_c(6,93)$. Dado que el valor de $t_c(6,93) > t_t(2,086)$ r resulta ser significativo por lo que podría considerarse de que existiría relación entre las variables, aceptándose H_1 .

Con respecto a la **Relación de Elongación**:

Figura 19- Correlación entre Relación de Elongación y Tasa de Incremento en superficie por cárcava (TCA)



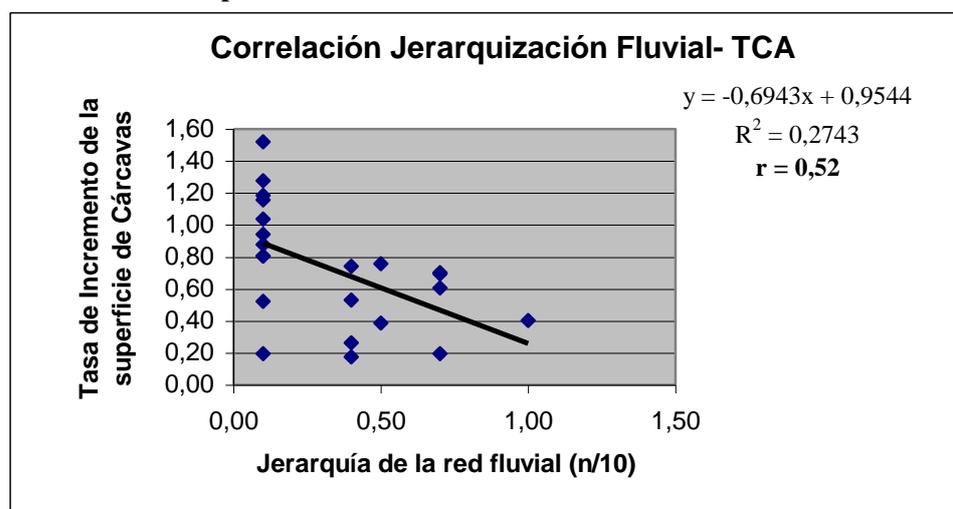
Para $n=22$, $v=20$, $t_c(2,36)$ Dado que el valor de $t_c(2,36) > t_t(2,086)$ r resulta ser significativo por lo que podría considerarse de que existiría relación entre las variables, aceptándose H_1 .

VIII.2.c. VARIABLES FÍSICAS

Dentro del factor físico se consideró como variables relevantes el desnivel, la jerarquización de la red de drenaje según Strhaler y el coeficiente de rugosidad a los efectos de realizar el análisis estadístico y poder evaluar la dependencia y el grado de dependencia entre estas variables y la tasa de incremento del área de la superficie de las cárcavas.

Con respecto a la relación de dependencia entre la tasa de crecimiento de las cárcavas y la jerarquización de la red fluvial se obtuvo el siguiente resultado:

Figura 20- Gráfico del grado de relación entre la Jerarquización de la Red Fluvial y la tasa de incremento de la superficie de cada cárcava 1943- 2000

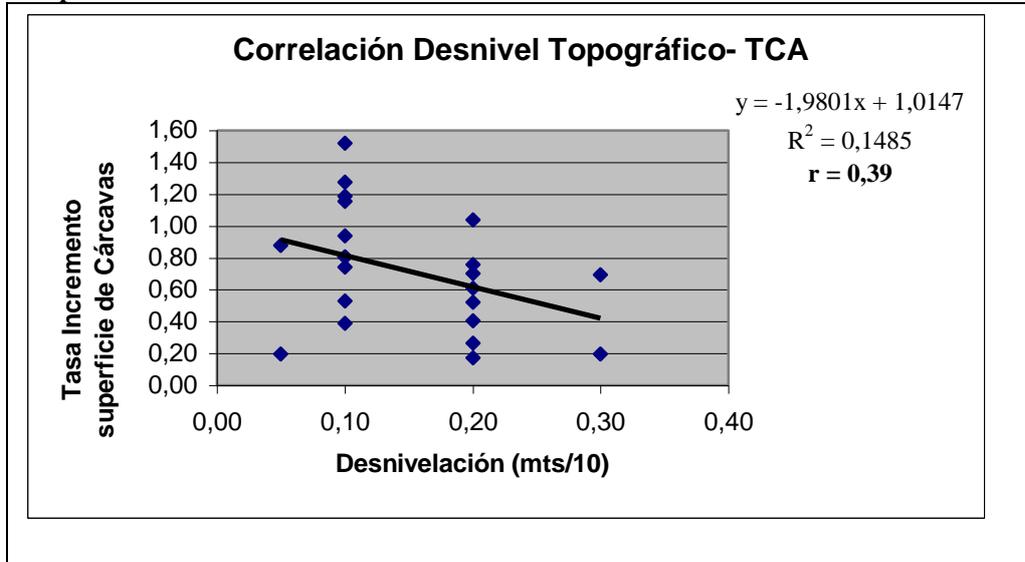


Para $n= 22$, $v= 20$, $t_c (2,34)$

Dado que el valor de $t_c (2,34) > t_t (2,086)$ resulta ser significativo por lo que podría considerarse de que existiría relación entre las variables, aceptándose H_1 .

Al analizar la relación entre el incremento superficial de las cárcavas y la desnivelación topográfica marcada por las curvas hipsométricas se obtuvo (Fig. 31):

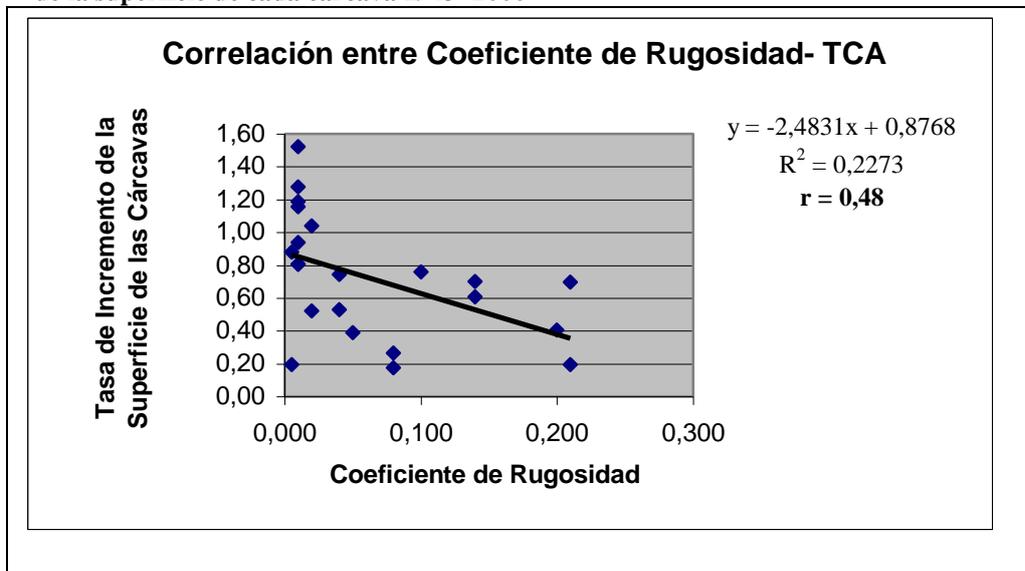
Figura 21- Gráfico del grado de relación entre el Desnivel Topográfico y la tasa de incremento de la superficie de cada cárcava 1943- 2000



Para $n=22$, $v=20$, $t_c (3,02)$, dado que el valor de $t_c (3,02) > t_t (2,086)$ r resulta ser significativo, existiría relación entre las variables, aceptándose H_1 .

Al evaluar la dependencia entre el coeficiente de rugosidad con la tasa de incremento de la superficie erosionada (Fig. 32) se obtuvo:

Figura 22- Gráfico del grado de relación entre el Coeficiente de Rugosidad y la tasa de incremento de la superficie de cada cárcava 1943- 2000



Para $n=22$, $v=20$, $t_c(3,53)$ y dado que el valor de $t_c(3,53) > t_t(2,086)$ resulta ser significativo por lo que podría considerarse de que existiría relación entre las variables, aceptándose H_1 .

VIII.2.d. VARIABLES ANTRÓPICAS

La variación de la superficie forestada fue la variable seleccionada para evaluar la dependencia de este uso del suelo con la tasa absoluta de incremento de las cárcavas (TCA). Se entendió como “forestado” a la suma de las áreas ocupadas por el monte artificial denso y el monte artificial ralo conjuntamente, discriminando la superficie desnuda de las cárcavas. Se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla N° XII. Evolución de la superficie ocupada por los monocultivos forestales expresados a partir de la unidad como superficie inicial

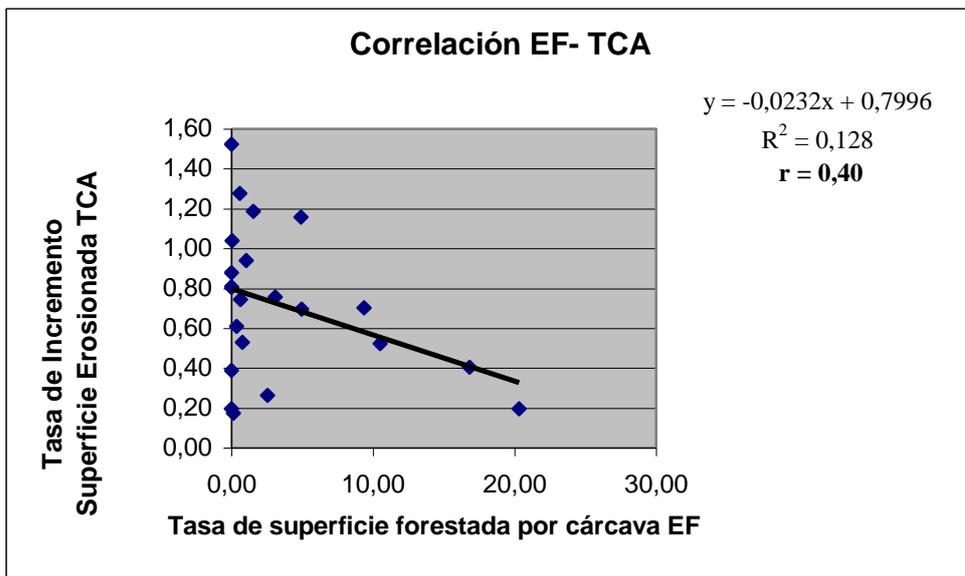
Car.	43D	66F	66D	86F	86D	98F	98D	00F	00D
1	1,00	0,68	0,32	0,71	0,29	0,71	0,29	0,72	0,28
2	1,00	0,33	0,67	0,34	0,66	0,43	0,57	0,44	0,56
3	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00
4	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,15	0,85	0,24	0,76
5	1,00	0,00	1,00	0,04	0,96	0,31	0,69	0,41	0,60
6	1,00	0,00	1,00	0,12	0,88	0,72	0,28	0,75	0,25
7	1,00	0,00	1,00	0,30	0,70	0,67	0,33	0,62	0,38
8	1,00	0,00	1,00	0,40	0,60	0,64	0,36	0,64	0,36
9	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,04	0,96	0,00	1,00
10	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,12	0,88	0,22	0,78
11	1,00	0,00	1,00	0,02	0,98	0,35	0,65	0,35	0,65
12	1,00	0,00	1,00	0,03	0,97	0,00	0,00	0,61	0,39
13	1,00	0,00	1,00	0,35	0,65	0,31	0,69	0,40	0,60
14	1,00	0,00	1,00	0,12	0,88	0,51	0,49	0,50	0,50
15	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00
16	1,00	0,02	0,98	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00
17	1,00	0,06	0,94	0,18	0,81	0,21	0,79	0,22	0,78
18	1,00	0,04	0,96	0,05	0,95	0,18	0,82	0,24	0,76
19	1,00	0,03	0,97	0,10	0,90	0,06	0,94	0,07	0,93
20	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00
21	1,00	0,01	0,99	0,00	1,00	0,10	0,90	0,13	0,87

22 1,00 0,00 1,00 0,00 1,00 0,00 1,00 0,00 1,00
D- suelo desnudo; F- suelo forestado

No existía forestación en cárcavas a 1943, por eso no aparece Columna 43F

Al analizar la relación de dependencia entre la tasa de crecimiento del área de la superficie de las cárcavas (TCA) y la tasa de la superficie forestada de las mismas (EF) se obtuvo como resultado de la correlación: (Fig.35).

Figura 23- Gráfico del grado de relación entre la Evolución del área forestada y la tasa de incremento de la superficie de cada cárcava 1943- 2000



IX- DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

IX. 1- DISCUSIÓN DE RESULTADOS A ESCALA DE MICROCUENCAS

Del procesamiento de los resultados se observó que existe una relación diferencial de dependencia entre las variables seleccionadas para describir los factores morfométricos, físicos y antrópicos que se supusieron incidían en el crecimiento de las cárcavas a escala de las microcuencas.

La intensidad en la relación de dependencia entre la variación del área de la superficie de las cárcavas sobre la superficie total de cada microcuenca (δEt) con las **VARIABLES MORFOMÉTRICAS** es baja para el **factor forma** y **razón de elongación** y que, una vez aplicado el estadístico t- student, se pudo comprobar que no existiría una relación de dependencia entre estas dos variables con el avance del área de la superficie erosionada de las microcuencas. Para la variable morfométrica **índice de circularidad**, si bien resultó que la correlación entre ésta con el incremento de la superficie erosionada es de baja intensidad dado el valor de $r= 0,24$, este valor resultó significativo al efectuar el t- student por lo que mostró que existiría cierta relación de dependencia entre las dos variables.

Los valores obtenidos a partir de la correlación de **VARIABLES FÍSICAS** con la variación del área de la superficie erosionada por las cárcavas (δet) para cada microcuenca indican que existe una relación de asociación directa entre el incremento en el área de la superficie de las cárcavas con la **pendiente media** y el **coeficiente de rugosidad** en cada una de las microcuencas. al mismo tiempo se pudo deducir que existiría relación de dependencia entre estas variables con el aumento de la superficie erosionada por microcuencas dado los resultados obtenidos al aplicar el estadístico t- student. Esta lógica subyacente a la dinámica geomorfológica de las microcuencas es

del tipo genérico, ya que muestran la relación entre pendiente del terreno y el escurrimiento fluvial y cómo a su vez, estas dos variables serían condición de existencia para desencadenar procesos de erosión.

A su vez, las variables área y jerarquización fluvial muestran una correlación débil en relación con la extensión de la superficie erosionada en cada microcuenca. sin embargo al evaluar la significatividad de r a través del estadístico t - student ésta indicó la posible relación entre las variables consideradas.

Con respecto a las **VARIABLES ANTRÓPICAS** seleccionadas, dado los valores obtenidos a partir de la correlación de variables, se deduce que la intensidad en la relación de dependencia entre éstas y la variación del área ocupada por las cárcavas no resultó significativa. Si bien la contracción de la superficie de la pradera resultó una variable de baja intensidad de correlación, es la que resultó significativa al evaluarla con respecto a la extensión en el área de la superficie erosionada a través del t - student.

No fue posible identificar una asociación directa entre forestación y extensión de la superficie erosionada. La forestación con eucaliptos no ha detenido el proceso de erosión y la extensión de las cárcavas, sino que el proceso erosivo continúa y el desmoronamiento de las cabeceras arrastra los árboles. Los ejemplos de este fenómeno se localizaron en las microcuencas 1, 2, 6 y 7.

Sin embargo, en las microcuencas forestadas con pinos en las cabeceras y en las que se empastó las cárcavas y la cobertura de pradera estival se mantuvo, éstas lograron estabilizarse transitoriamente, tal como ocurrió en las N° 16 y 17. (Fig. 24)

El uso agrícola del suelo ha sido marginal, vinculado a establecimientos granjeros especializados en el cultivo de papas y de forrajes para mantener la pecuaria extensiva. Tampoco la práctica agrícola incidiría en la extensión de la superficie de las cárcavas.

Figura 24. Microcuencas forestadas; a la izquierda activa con desmoronamientos y a la derecha estabilizada con empastamiento

**CÁRCAVA ACTIVA. CABECERA SUPERIOR
DESMORONADA CON SISTEMA RADICULAR**



**CÁRCAVA ESTABILIZADA. CABECERA SUPERIOR
FORESTADA CON PINOS**



En síntesis, los resultados podrían ser interpretados como:

- a) la pendiente media y el Coeficiente de Rugosidad serían las dos variables físicas que más estarían incidiendo en el proceso geomorfológico de extensión de las cárcavas a nivel de microcuencas.
- b) que a escala de la microcuenca y dada la estructura y dinámica del sistema hidro- geomorfológico de cada una de ellas, el incremento en las dimensiones de las cárcavas está relacionado debiera explicarse como fenómeno a otra escala, más acotado geográficamente y en la que estarían incidiendo otros factores que explicarían la dinámica erosiva.

IX.2- DISCUSIÓN DE RESULTADOS A ESCALA DE CÁRCAVAS

Del conjunto de los factores analizados puede resumirse que:

Dentro de las variables estimadas para evaluar la relación existente entre el factor morfométrico y el incremento del área de la superficie de las cárcavas, todas ellas (Factor Forma, Índice de Circularidad y Razón de Elongación) demostraron estar asociadas aunque el factor forma y la razón de circularidad fueron las variables que revelaron tener una relación de dependencia significativa. El Factor Forma remite a la relación entre el área y el largo máximo de la cárcava, mientras que el Índice de Circularidad permite identificar la relación entre la forma geométrica con la capacidad de concentrar energía erosiva. Si se considera la dinámica hidrológica en las cárcavas como análoga a la de microcuencas, los resultados se aproximan al reporte realizado por Ward y Robinson (2000) quienes sostienen que las microcuencas más alargadas tienden a una respuesta más difusa en comparación con las respuestas de tormentas de caudales altos en microcuencas compactas. Esto se debe a que la escorrentía que drena todos los límites de una microcuenca 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, la geometría 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.

Por lo que, las cárcavas que han sufrido mayor incremento absoluto en su tamaño tienen una forma geométrica con propensión a la circularidad, indicando la tendencia a la extensión a partir de las cabeceras laterales una vez que cada unidad hidrogeomorfológica considerada alcanzó cierta extensión longitudinal.

Este fenómeno está relacionado con dos variables correspondientes a los factores físicos y antrópicos.

Al relacionar el factor físico con la tasa de incremento del área de la superficie de las cárcavas las variables Jerarquización Fluvial de la red y el Coeficiente de Rugosidad fueron las que demostraron tener relación de dependencia significativa. Se destaca la modalidad de escorrentía en régimen de semiaridez²⁰, dadas las condiciones ecológicas del terreno de las cárcavas, estaría propiciando un aumento de la erosión en régimen de torrencialidad en eventos de tormentas. Y del factor antrópico, la construcción de la ruta fue una variable significativa pues actuó modificando la escorrentía al funcionar como divisoria de aguas artificial y que según Sganga (1999) debido a esta red de drenaje vial, se inician procesos erosivos producto de las banquetas inadecuadas, con descargas en sitios críticos.

Del factor físico, las variables que resultaron más significativas fueron las que explican la erosión fluvial, o sea la jerarquización de los cursos fluviales según Strahler, que es un indicador de las condiciones del escurrimiento superficial y subsuperficial y la diferencia topográfica, variable que resultó significativa cuando se la integra al coeficiente de rugosidad, mostrando una dependencia relativa con el aumento en el crecimiento del área de la superficie de las cárcavas. Siguiendo a González de Matauco (2004) 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.

²⁰ El régimen semiárido se manifiesta en el comportamiento endorreico del cauce, la torrencialidad del caudal, la poca selectividad en el transporte de materiales.

A su vez, Jaque y Manzanares (2005) demostraron que, en microcuencas de superficie con un área $< 20 \text{ Km}^2$ y jerarquización de órdenes fluviales < 4 la variable física que predeciría la erodabilidad es, en primer lugar la pendiente media y en segundo término la red de drenaje. Y antes, Cicassi y Palmieri (1986, 1987) reportaron que las variables físicas que podrían ser consideradas para evaluar la erodabilidad del terreno son la desnivelación y la densidad de la red de drenaje debida a la profundización del cauce.

Del factor antrópico, la variable estimada fue incremento de la forestación dentro de la cárcava; este fenómeno demostraba guardar dependencia con el incremento de la superficie de las cárcavas aunque con baja intensidad.

La construcción de la ruta es una variable que tuvo incidencia en la extensión longitudinal de las cárcavas a partir de sus cabeceras superiores al actuar como cuchilla que afecta el escurrimiento general dentro de las microcuencas contenedoras de las cárcavas y al mismo tiempo concentrar el volumen y la intensidad del escurrimiento en los canales de desagües viales. Takken *et al.* (2008), investigando el comportamiento del patrón de drenaje en 3 cuencas del sureste de Australia demostraron la relevancia que tiene la modificación del escurrimiento de las aguas pluviales como producto de la construcción de rutas y la incidencia de la escorrentía que surge a partir de los desagües viales que, sumadas a la pendiente, están explicando el encauzamiento y la consolidación de cárcavas.

Por lo que el incremento en la superficie de las cárcavas es respuesta no solo a la integración de las variables morfométricas, ambientales y antrópicas, sino también 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.

El escurrimiento superficial llega a la cárcava con poder erosivo y, dada la estructura geológica 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 hidrológico con períodos de balance hídrico positivo. El agua de escurrimiento subsuperficial impulsada por la pendiente en estructuras geológicas arenosas, permeables, tiene una tendencia a la erodabilidad pronunciada. Al aflorar en las cabeceras de las cárcavas (puntos de ruptura) socava las paredes de las cabeceras de las mismas provocando el desprendimiento de materiales. Es en ese preciso momento cuando la escorrentía fluvial intensificada por efecto de los desagües de la ruta contribuiría al desmoronamiento de los materiales socavados por el agua de escorrentía subsuperficial y los transportaría poco selectivamente producto del comportamiento hidrológico en régimen de semiaridez. Esto favorecería el escurrimiento y transporte de materiales dada la mayor impermeabilidad del suelo de la cárcava (Fig.25).

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. A su vez 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 de las mismas, hasta que llegan a su máximo desarrollo, o sea, alcanzan el interfluvio. 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.

El incremento en el ancho de la superficie de las cárcavas se debe a la erosión de los taludes laterales de las mismas.

Este fenómeno se asocia a la erosión que afecta a las lomadas costeras que tienen desniveles de hasta 30 metros, sobre una estructura geológica sedimentaria con una secuencia estratigráfica de materiales con diferencias en texturas friables, sobre la que se desarrollaron suelos superficiales con estructuras con alto riesgo de erosión, y con un ecosistema de pradera estival poco denso. En condiciones de escasa pendiente (1-10%) en régimen de semi aridez, el intemperismo sobre los materiales friables, la presencia de una napa freática muy próxima a la superficie y la retirada de materiales por abarrancamientos de manera poco selectiva, actuarían suavizando las pendientes y dando origen a formas de aplanamiento en las que pueden incluso conservarse promontorios testigos (Viers, 1983).

Figura 25. Cárcavas con desmoronamiento a partir de puntos de rupturas por:

A) Esguerrimiento Subsuperficial y superficial

B) Patrón de esguerrimiento modificado por desagüe vial



Figura 17. A- CÁRCAVA N° 2.



Figura 17. B- CÁRCAVA N° 11..

Desde el frente marítimo (Fig.35) y en condiciones de tormenta determinadas por precipitaciones frontales y con vientos procedentes del cuadrante sur que implican ascenso temporario del mar, cuándo este llega a las cárcavas irrumpe por el cauce de la red fluvial de las mismas. Este fenómeno afectaría socavando las paredes laterales de las bocas de las cárcavas.

La consecuencia de la conjunción de factores forzantes terrestres/ marítimos hace que las cárcavas continúen extendiéndose en superficie, impulsando la modificación de la morfometría cuando el incremento de la superficie erosionada se produce a partir de las cabeceras laterales alterándose la relación ancho/largo. Incluso dos cárcavas consecutivas pueden capturarse generando un aumento sustancial del área erosionada,

modificando su morfometría y la dinámica fluvial provocando nuevos escenarios que facilitan el desarrollo de la erosión.

Figura 35- Dinámica geomorfológica impulsada por la forzante marítima

IX.3. MODELO INTERPRETATIVO

Una vez identificados en forma ponderada, y jerarquizados cuantitativamente los factores forzantes del proceso de erosión que tanto a escala de las microcuencas como a la de las propias cárcavas inciden en el incremento en el área de la superficie de las mismas, se procedió a formular un modelo matemático que permitiera expresar ese fenómeno.

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.

De esa forma se formuló la siguiente ecuación para expresar la extensión de la superficie de las cárcavas en un momento t:

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

En 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.

Se calculó la tasa de crecimiento relativa de las cárcavas T_{cr} para el período de 55 años que se desarrolló entre 1943- 1998 tal como se describió en la leyenda explicativa de la fórmula.

Esto se hizo pues en ese lapso de tiempo se pudo comprobar que el incremento total del área erosionada ocupada por las cárcavas, mantenía una constante de 2 hectáreas por año para toda el área de estudio a excepción del período 1998- 2000, cuyos resultados se relativizaron.

Si bien es destacable ese aumento en el área de la superficie erosionada en tan sólo 2 años, es necesario hacer la salvedad de que no se dispuso de información para un período tan poco espaciado en el resto del corte temporal realizado, por lo que el sesgo de tal resultado podría ser significativo; eso adquiere mayor relevancia si se considera la posible irregularidad en el comportamiento de los factores forzantes de los procesos de erosión, en un área de interfase costera en la que las condiciones geográficas y ambientales son homogéneas.

Tabla I. Evolución del área (expresada en ha) de la superficie ocupada por las cárcavas (1943-2000) y % de incremento del área considerando la superficie de 1494 ha como superficie total (100%)

Año	Área de Cárcavas (ha)	% (1.494ha = 100)	Diferencia (ha)	Incremento (ha/año)
1943	234,50	15,69	-	-
1966	281,35	18,83	46,85	2
1986	302,34	20,24	20,99	2
1998	324,39	21,71	22,05	1,9
2000	347,95	23,29	23,56	7,8

Luego se aplicó la ecuación formulada a los efectos de calcular el valor esperado del área de la superficie de las cárcavas para el año 2000 bajo el supuesto de que las mismas estuvieron sometidas a forzantes erosivas constantes. Así a los resultados obtenidos se les definió como *valor esperado de la superficie horizontal de las cárcavas Ex (2000)*.

Tabla N° LIV. Evolución de la superficie de las cárcavas expresada en hectáreas entre 1943- 2000; Tasa de Crecimiento Absoluto de las Cárcavas entre 1943- 1998 (TCA) y Tasa de Crecimiento por año (TCA/55 años). Valor esperado de la superficie de cada cárcava para el año 2000 Ex (2000) y valor del área medida de las cárcavas para el año 2000.

CARCAVA	AREA 43	AREA 66	AREA 86	AREA 98	TCA 43- 98	Tcr	Ex(2000)	AREA 00
1	7,59	10,92	12,89	13,21	0,74	0,013	13,57	15,47
2	14,60	18,17	18,83	19,41	0,33	0,006	19,64	23,48
3	1,53	1,74	1,77	1,78	0,16	0,003	1,79	1,83
4	0,76	0,93	1,33	1,36	0,79	0,014	1,40	1,73
5	15,18	17,04	21,76	22,21	0,46	0,008	22,58	25,83
6	16,07	20,45	24,23	25,60	0,59	0,011	26,15	27,24
7	7,13	9,78	10,51	11,92	0,67	0,012	12,21	13,83
8	7,00	9,16	9,73	10,08	0,44	0,008	10,24	12,20
9	0,99	1,25	1,45	1,73	0,75	0,014	1,78	1,86
10	4,06	4,75	5,09	5,81	0,43	0,008	5,90	6,21
11	39,25	43,71	44,55	44,86	0,14	0,003	45,09	46,95
12	45,22	52,66	53,63	62,88	0,39	0,007	63,77	63,50
13	28,44	29,66	30,92	33,27	0,17	0,003	33,48	33,38
14	10,16	12,45	14,26	17,08	0,68	0,012	17,50	17,86
15	3,43	5,13	5,53	5,55	0,62	0,011	5,67	6,19
16	3,87	4,73	4,95	5,04	0,30	0,005	5,10	5,37
17	13,62	15,41	15,95	16,17	0,19	0,003	16,28	17,22
18	3,78	6,33	6,89	7,59	1,01	0,018	7,87	8,15
19	1,61	2,77	2,99	3,26	1,02	0,019	3,38	3,52
20	0,23	0,42	0,46	0,58	1,52	0,028	0,61	0,58
21	8,74	11,90	12,62	12,81	0,47	0,008	13,03	13,31
22	1,24	1,99	2,00	2,19	0,77	0,014	2,25	2,24

Al comparar las columnas correspondientes al valor esperado de la superficie horizontal de las cárcavas $E(x)$ con el valor real medido que aparece en la columna Área 2000, se pudo comprobar que existen diferencias, hecho que requiere de un factor de corrección α .

Para calcular α se efectuó el cociente entre el valor real del área de la superficie horizontal de las cárcavas (Área 2000) sobre el valor del área esperado $Ex (2000)$.

La diferencia obtenida estaría cuantificando el factor de corrección para cada cárcava.

Entonces se reformuló el modelo matemático incorporándole el factor de corrección, resultando:

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

En 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.

α - Factor de corrección

Tabla N° LV. Evolución de la superficie de las cárcavas expresada en hectáreas entre 1943- 2000; Tasa de Crecimiento Absoluto de las Cárcavas entre 1943- 1998 (TCA) y Tasa de Crecimiento por año (TCA/55 años). Valor esperado de la superficie de cada cárcava para el año 2000 Ex (2000) y valor del coeficiente α producto del cociente entre el valor del Área (2000)- Extensión real de las cárcavas en el 2000- sobre su valor esperado Ex (2000) luego de aplicar la ecuación

CARCAVA	AREA 43	TCA		Ex(2000)	AREA 00	α
		43- 98	(55 años)			
1	7,59	0,74	0,013	13,57	15,47	1,140
2	14,60	0,33	0,006	19,64	23,48	1,195
3	1,53	0,16	0,003	1,79	1,83	1,022
4	0,76	0,79	0,014	1,40	1,73	1,237
5	15,18	0,46	0,008	22,58	25,83	1,144
6	16,07	0,59	0,011	26,15	27,24	1,042
7	7,13	0,67	0,012	12,21	13,83	1,133
8	7,00	0,44	0,008	10,24	12,20	1,191
9	0,99	0,75	0,014	1,78	1,86	1,047
10	4,06	0,43	0,008	5,90	6,21	1,052
11	39,25	0,14	0,003	45,09	46,95	1,041
12	45,22	0,39	0,007	63,77	63,50	0,996
13	28,44	0,17	0,003	33,48	33,38	0,997
14	10,16	0,68	0,012	17,50	17,86	1,020
15	3,43	0,62	0,011	5,67	6,19	1,091
16	3,87	0,30	0,005	5,10	5,37	1,054
17	13,62	0,19	0,003	16,28	17,22	1,058
18	3,78	1,01	0,018	7,87	8,15	1,036
19	1,61	1,02	0,019	3,38	3,52	1,041
20	0,23	1,52	0,028	0,61	0,58	0,948
21	8,74	0,47	0,008	13,03	13,31	1,022
22	1,24	0,77	0,014	2,25	2,24	1

Tabla LVI. Tipología de Cárcavas según valor α ordenadas en rangos a partir del valor de la media geométrica del conjunto de resultados

α	CARCAVA	α	CARCAVA	α	CARCAVA
0,948	20	1,036	18	1,091	15
0,995	22	1,041	19	1,133	7
0,997	13	1,042	6	1,140	1
1,020	14	1,047	9	1,144	5
1,022	21	1,052	10	1,191	8
1,022	3	1,054	16	1,195	2
		1,058	17	1,237	4
		1,066	G		

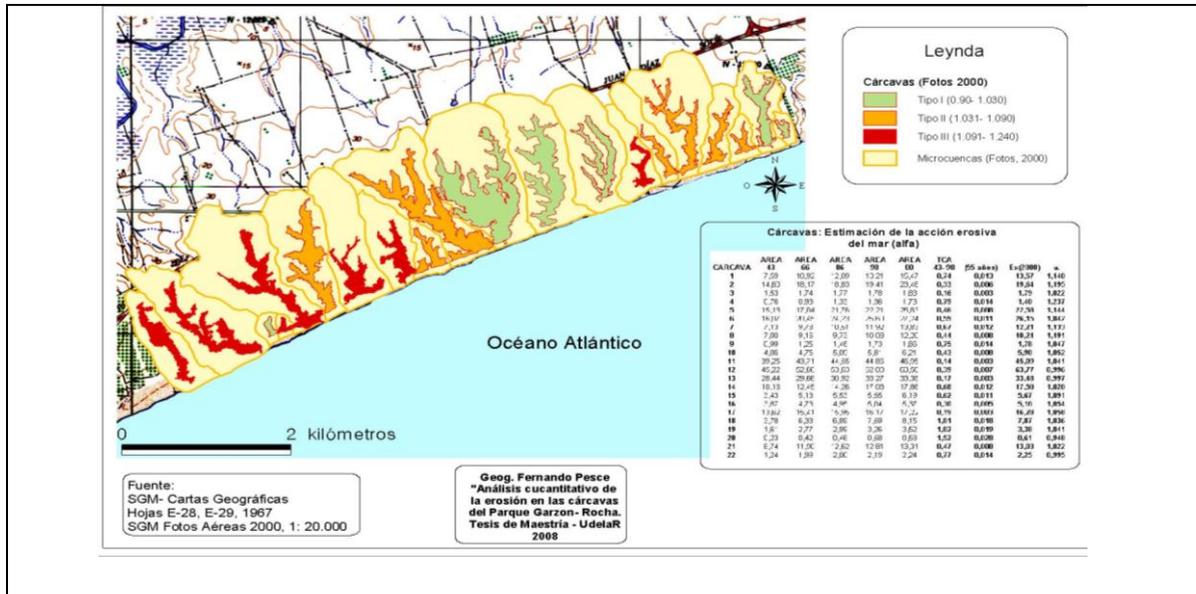
Así los resultados obtenidos se organizaron en rangos considerando el valor de la media geométrica para el conjunto de factores pudiéndose identificar tres tipos de cárcavas (Tabla N° LVI).

- c) **Cárcavas activas**- son aquellas cuyos valores de α se encuentran por encima de la media geométrica del conjunto de datos obtenidos. Dentro de esta categoría se encontraban al año 2000 el 32% de las cárcavas ($n = 7$).
- d) **Cárcavas no activas temporalmente**- son las que por el valor obtenido de α se ubican entre la media geométrica del conjunto de valores y el dato correspondiente al rango inmediatamente inferior. Representan al 36% del total de las geoformas ($n = 8$).
- e) **Cárcavas temporalmente estabilizadas**- se consideró en esta categoría a aquellas cárcavas ubicadas entre el valor del rango medio inferior y el menor resultado obtenido. Son el 32% de las mismas ($n = 7$).

El factor de corrección debe interpretarse como que el comportamiento de los factores forzantes morfométricos, físicos y antrópicos tienen una dinámica espacio temporal compleja en períodos interanuales, en los cuáles la interrelación de las variables no tiene una tendencia predecible. El comportamiento de los factores atmosféricos estaría incidiendo en la irregularidad expresada por el factor de corrección, y éstos factores

estarían vinculados a la sucesión de eventos de “El Niño” cuyas consecuencias más notorias se traducen en un incremento de las precipitaciones.

Figura 36. Tipología de cárcavas según dinámica geomorfológica



XI. CONCLUSIONES

A lo largo del trabajo se analizó la interrelación entre factores morfométricos, físicos y antrópicos con el incremento en el área de la superficie de las cárcavas en el Parque Lacustre Garzón.

Así fue que dentro del tipo **factores morfométricos** se determinaron como variables representativas el **factor forma**, **la relación de elongación** y el **índice de circularidad**.

Los datos cuantitativos obtenidos permitieron dar respuesta a la primera interrogante formulada para estructurar la investigación: *¿Son las variables geométricas determinantes intrínsecas en el proceso evolutivo de las cárcavas?*

Por lo que se concluye que, a escala de microcuencas, las variables seleccionadas para analizar la incidencia del factor morfométrico en el proceso evolutivo de las cárcavas no tienen en sí mismas validez interpretativa significativa a excepción del Índice de Circularidad, pero que se relacionaría con una intensidad muy baja.

El estudio de la morfometría de las cárcavas reveló, en primera instancia, de que la transposición de variables indicativas de la erodabilidad de microcuencas tiene validez también para comprender la dinámica de las cárcavas y concluir entonces que las variables geométricas Factor Forma e Índice de Circularidad serían las propiedades de las cárcavas que podrían considerarse representativas al momento de relacionar el factor morfométrico con la erodabilidad intrínseca a cada una de las unidades hidrogeomorfológicas consideradas.

El segundo tipo de factores intrínsecos fueron los **factores físicos**.

Los valores obtenidos para las variables permiten concluir que, a la escala de las microcuencas todas las variables físicas estarían guardando cierta relación de

dependencia con el incremento en el área de la superficie de las cárcavas pero en diferentes grados de intensidad.

El coeficiente de rugosidad resultó ser de relevancia significativa al momento de explicar la erodabilidad, seguido por la pendiente media. La jerarquía fluvial y el área guardarían relación pero con baja intensidad.

El coeficiente de rugosidad permite visualizar cuantitativamente en forma integrada las características físicas que mejor explican la erodabilidad del territorio como son la pendiente y el patrón de drenaje superficial (a su vez, éste es reflejo de las características del suelo y subsuelo que permiten encauzar la red hídrica).

Ya a escala del patrón de cárcavas la correlación entre las variables físicas y la tasa de incremento del área de cada una de ellas permitió concluir que son las variables físicas coeficiente de rugosidad y la jerarquización de la red de drenaje las que permiten interpretar la evolución de las cárcavas al momento de explicar los procesos de erosión fluvial.

Otra pregunta formulada fue *¿Es posible formular un modelo matemático interpretativo para predecir la extensión horizontal de las cárcavas?*. Al momento de realizar la fotointerpretación y la digitalización de las cárcavas se pudo estimar la inexistencia de una regularidad en el proceso de erosión que pudiera permitir calcular un coeficiente constante de incremento en el área de la superficie de las mismas. Este fenómeno se corroboró con los resultados obtenidos a partir de la medición de la superficie de cada una de las cárcavas en cada corte temporal en los que se efectuó y el posterior cálculo de la tasa de incremento del área. Al mismo tiempo, el análisis de la correlación entre los distintos factores considerados con la tasa de extensión de la superficie de las cárcavas indicó que, a escala de las microcuencas, la explicación

geomorfológica del proceso erosivo es débil. A esto se le debió sumar las modificaciones en el patrón de escurrimiento superficial en las microcuencas producido por la ruta asfaltada que actúa como “cuchilla artificial”.

Se arribó a la formulación de una ecuación que, con base empírica, permitió expresar cuantitativamente el incremento en el área de las cárcavas por unidad temporal. La interacción entre los factores en períodos interanuales es compleja, fenómeno que se cuantificó con un coeficiente de corrección, que permitió calibrar la ecuación predictiva para la extensión de las cárcavas por unidad de tiempo.

Con respecto a los factores extrínsecos incidentes en los procesos de erosión y extensión de las cárcavas se consideraron como factores antrópicos las variables cambios en los usos del suelo tanto a nivel de microcuenca como de las cárcavas. Es así que se pretendió responder la tercera de las preguntas formuladas *¿Cuáles son las variables antrópicas que se correlacionan e inciden directamente en la extensión de la superficie de las cárcavas?*

Al nivel de las microcuencas se pudo establecer que la contracción de la superficie de la pradera estaría relacionada con el avance de la superficie forestada y el incremento del área de las cárcavas pero con baja intensidad. Al realizarse la correlación lineal entre la superficie forestada y la tasa de incremento de la superficie erosionada resultó que no existe dependencia directa entre ambas variables. Lo mismo ocurrió cuando se evaluó la incidencia de la superficie agrícola.

Sin embargo, a escala de las cárcavas se pudo comprobar cuantitativamente que existiría cierto grado estrecho de dependencia entre el aumento de la superficie forestada con el incremento del área de las cárcavas. En los chequeos de campo se pudo corroborar que la forestación no es impedimento para el avance de la erosión y la extensión de las

cárcavas. En el 30% de las cárcavas forestadas con eucaliptos, el desmoronamiento del terreno al avanzar la erosión implica también el desmoronamiento de los árboles.

Por último y para dar respuesta a la interrogante *¿A qué tipología se puede arribar para clasificar con fines explicativos a las cárcavas?*

Se concluye que:

Existen tres tipos de cárcavas:

- Las que se encuentran activas como producto de la afectación continua del proceso de erosión debido a la interacción de los factores morfométricos, físicos y antrópicos descriptos a través de forzantes en interacción muy dinámica.
- El conjunto de cárcavas que se encuentran temporalmente estabilizadas porque se detuvo el proceso erosivo.
- Las cárcavas en las que la inestabilidad ha sido y continúa discontinua en el tiempo y en el espacio, ya que la dinámica erosiva puede estar determinada irregularmente por factores terrestres en interacción temporal aleatoria.

Dada la irregularidad manifiesta en la interacción compleja del conjunto de factores morfométricos, físicos y antrópicos, la tipología a la que se arribó también puede definirse como transitoria, fenómeno comprobado en campo. Pareciera ser que la condición más constante es la identificada por las cárcavas del tipo 3, en las que los procesos erosivos y la estabilidad geomorfológica constituyen períodos de alternancia temporal en función de la acción de los factores forzantes terrestres en interacción con los marítimos.

Este enunciado tiene la pretensión de constituirse en hipótesis de nuevos trabajos de investigación a modo de borde disciplinar.

Las nuevas interrogantes que surgen son:

- 1. ¿Cuál es la regularidad temporal en la interrelación de las variables?*
- 2. ¿Qué incidencia tiene el aumento temporario del mar?*
- 3. ¿Cómo se comportaría tal variable ante eventos de tormentas menos espaciados en el tiempo como producto del cambio global?*

BIBLIOGRAFÍA

- Achkar, M; Cayssials, R (Coord.); Domínguez, A.; Pesce, F. (1993). Rocha: un modelo de turismo y medio ambiente para el siglo XXI. Trabajo presentado en la V Ágora de la República. La Paloma, Rocha. 25-1-1993.
- 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 AT-Uruguay.
- Aparicio, Francisco. (1989). Fundamentos de Hidrología de Superficie. Editorial Limusa. México.
- Aspiroz, A; Rilla, F. (1997) Aves amenazadas. En Reserva de Biosfera Bañados del Este. Avances del Plan Director. PROBIDES.
- Band, L. (1993). Extraction of Channel Networks and Topographic Parameters from Digital Elevation Data. Channel Network Hydrology.
- Bosque Sendra, J. (1992). Sistemas de Información Geográfica. Rialp. Madrid.
- Bossi, J.; Navarro, R. (1988). Geología del Uruguay. Tomo II. Universidad de la República.
- Caffera, R.M.; Céspedes, C. González, A.; Gutiérrez, M.O.; Panario, D.H. (1991). Desarrollo forestal y medio ambiente. 11. Hacia una evolución de efectos ambientales de la forestación en Uruguay con especies introducidas. CIEDUR. Serie Investigaciones N° 85.
- Cámara, G.; de Medeiros, J.S. (1996). Geoprocessamento para projetos ambientais. São Jose dos Campos. INPE, www.dpi.inpe.br/geopro/papers.html.
- Cantón, V. (2002). Las áreas protegidas como herramienta de apoyo a la gestión y ordenación ambiental del territorio. En Dominguez, A.; Prieto, R.G. (coords.). Perfil Ambiental del Uruguay 2002. Comunidad Nordan.
- 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.
- Chorley, R. (1971). Introduction to Geographical Hydrology. Editorial Methuen & Co. Londres.
- Cicacci, S *et al.* (1987) Indirect evaluation of erosion entity in drainage basins through geomorphic, climatic and hydrological parameters. En Gardiner, V. International Geomorphology. John Wiley & sons Ltd. London, England.
- Consens, M. (2004) Historia de la costa atlántica uruguaya. CIAAE www.puntomatero.com/proyectos/cristel/historia.html
- Corsi, W. (1978). Clima. En Pasturas IV. CIAAB. Miscelánea N° 18.
- 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).
- Damiani, O. (1990). Desarrollo forestal y medio ambiente. 3. Un marco conceptual y metodológico para incorporar los impactos regionales y locales en el análisis del complejo forestal. CIEDUR. Serie Investigaciones N° 73.
- De Álava, D. (Coord); Panario, D.; Fernández, G. (1994). Estudios para la propuesta de un manejo integrado de la zona costera del departamento de Rocha (propuesta preliminar). UNCIEP. Facultad de Ciencias, Montevideo, Uruguay.

- De Álava, D; Rodríguez, L. (2007). Zona costera de la laguna Garzón: recomendaciones para su conservación y manejo. Documento de Vida Silvestre, noviembre de 2007. Montevideo, Uruguay.
- Duran, A.; Norbis, W. (1997). Clima. En Reserva de Biosfera Bañados del Este. Avances del Plan Director. PROBIDES.
- García Jiménez, E; Gil, J; Rodríguez, G. (2000). Análisis Factorial. Cuadernos de Estadística. Ed. La Muralla. Madrid.
- 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.
- Jaque, E; Manzanares, P. (2005). Evaluación de la eodabilidad hídrica en la cuenca de la Laguna Quiñeño, VII Región del BíoBio, Chile. Revista de Geografía, Monte Grande, julio. N° 33. Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago. Pp. 103- 112.
- Jardi, M. (1985). Forma de una cuenca de drenaje. Análisis de variables morfométricas que las definen. Revista de Geografía, Monte Grande, n° 19. Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago. Pp 41- 68.
- Jiménez J; Bertomeu M. (2002). Cálculos de hidrogramas de crecida en cuencas semiáridas. Aplicación del hidrograma geomorfológico instantáneo unitario. En: Revista de la Asociación de Geógrafos Españoles No. 37.
- González Bernáldez, F. (1981). Ecología y paisaje. Ed. Blume, H. Madrid.
- González, V; Pesce, F; Rodríguez, A; Zerbino, S. (2003). Diagnóstico Ambiental del Parque Garzón. Maestría en Ciencias Ambientales. UdelaR. Montevideo.
- Leyland, J; Darby, S. (2008). An empirical- conceptual gully evolution model for channelled sea cliffs. Geomorphology, December 2008.
- López Sancho, J.L. (consult). 1997. Misión de apoyo sectorial efectuada en Uruguay (Informe de consultoría). AECI-PROBIDES.
- Molina, B. (1997). Vegetación. En Reserva de Biosfera Bañados del Este. Avances del Plan Director. PROBIDES.
- Norbis, W.; Langone, J. (1997). Fauna. En Reserva de Biosfera Bañados del Este. Avances del Plan Director. PROBIDES.
- Panario, D. (2000). Las playas uruguayas, su dinámica, diagnóstico de situación actual y tendencias a mediano plazo. En Domínguez, A.; Prieto, R.G. (coords.). Perfil Ambiental del Uruguay 2000. Comunidad Nordan.
- Pereira, R.; Zubía, M.; Fagetti, C. (1997). Lagunas de Rocha y Garzón, dos ecosistemas singulares. PROBIDES.
- Porzecanski, I; Fagetti, C. (1997). Producción y socioeconomía. En: Reserva de Biosfera Bañados del Este. Avances del Plan Director. PROBIDES.
- Romero González, E.; Pérez Mora, F.; Sande Toro, J.J. (2001). El diagnóstico ambiental inicial. En Agenda Local 21 de Sevilla. Diagnóstico ambiental. www.agenda21local/pdfdir/5diagnosticoambiental.pdf.
- Santiago Enrique. (2007). Generalidades sobre la erosión en cárcavas. En: Publicación de la Universidad de Oriente. Ciudad Bolívar. Venezuela.
- Sciandro, J.L. (2000). Legislación sobre medio ambiente en la República Oriental del Uruguay. Inventario normativo y recopilación de derecho positivo. Montevideo. FCU, PROBIDES.
- 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.
- Takahashi, G; Takashi, G; Kaichiro, S. (2008). Hyporeic flow as a potential geomorphic agent in the evolution of channel morphology in a bed river. En *Catena*, Volume 73, Issue 1, 15th march. Pp. 98- 106.
- Takken, I; Croke, J; Lane, P. (2008). Thresholds for channel initiation at road drain outlets. En *Catena*, Volumen 75, Issue 3. 15th november. Pp. 257- 267.
- Teixeira, A.A.; Matias, L.F.N.; Moretti, E. (1995). Qual a melhor definição de SIG? *Fator GIS* 11:20-24.
- Viers, G. (1983). *Tratado de Geomorfología*. Ed. OIKOS TAU, Barcelona.
- Ward, R; Robinson, M. (2000). *Principles of hydrology*. Mc Graw- Hill, England. 360 páginas.
- 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