

Evaluación multitemporal de procesos de erosión en ladera mediante el uso de SIG y sensores remotos en la micro-cuenca torrencial 'La Machirí', estado Táchira-Venezuela

Evaluate multi-temporal erosion processes in hillside through use SIG and sensing remotes The micro-watershed torrential 'The Machirí', Táchira state-Venezuela

Camargo Cristopher¹, Vidal Raúl² y Andrades Jesús²

Recibido: octubre, 2012 / Aceptado: abril, 2013

Resumen

La micro-cuenca torrencial 'La Machirí', ubicada en el estado Táchira, no ha escapado a los procesos de erosión. La coincidencia de aspectos naturales que le otorgan una cierta fragilidad ambiental y la intervención antrópica, desencadenaron uno de los fenómenos erosivos más importantes al occidente venezolano: las cárcavas de la Machirí, dado el desequilibrio ecológico que representó en su momento de aparición y que sigue estando presente en nuestros días. Se evaluó la dinámica de los procesos generadores de volúmenes de suelo desplazados por procesos de erosión de la micro-cuenca torrencial 'La Machirí', mediante el estudio multitemporal con un Sistema de Información Geográfica (SIG), a partir de fotografías aéreas, una ortofoto generada a partir de un Software Fotogramétrico Digital (SFD) y una imagen satelital SPOT-5, lográndose a partir de ellas estimar la evolución, estado, tipo y grado de los procesos en la micro-cuenca torrencial 'La Machirí' para los periodos 1952, 1976 y 2010.

Palabras clave: La Machirí; erosión; SIG, análisis multitemporal.

Abstract

The micro-watershed torrential 'The Machirí' located in Táchira state, has not escaped erosion processes. The coincidence of natural features that give a certain environmental fragility, and human intervention, triggered one of the most important erosive phenomena in western Venezuela: the Machirí gullies, given the ecological imbalance it has had at the time of occurrence that is still present nowadays. The dynamics of the processes generating volumes of soil displaced by erosion processes of the micro-watershed torrential 'The Machirí', were evaluated by means of the Geographic Information System (GIS) multi-temporal study from aerial photographs, an orthophoto created from a Digital Photogrammetric Software (DPS) and a SPOT-5 satellite image, from which it was able to estimate the evolution, state, type and degree of the processes in the micro-watershed torrential "The Machirí" for the periods 1952-1976 and 1976-2010.

Key words: The Machirí; erosion; GIS; multitemporal analysis.

1 Universidad Nacional Experimental del Táchira, Departamento de Carreras Técnicas Semipresenciales (CTS-UNET), Táchira-Venezuela.

2 Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Centro de Estudios Forestales y Ambientales de Postgrado, Mérida-Venezuela. Correo electrónico: ccamargo@unet.edu.ve; rvidal@ula.ve; andrades@ula.ve

1. Introducción

La micro-cuenca torrencial ‘La Machirí’, ubicada en el estado Táchira, no ha escapado a los procesos de erosión, la coincidencia de aspectos naturales le otorgaron una cierta fragilidad ambiental que aunado a la fuerte intervención antrópica, desencadenaron uno de los fenómenos erosivos más importantes al occidente venezolano: las cárcavas de la Machirí, dado al desequilibrio ecológico que representó en su momento de aparición y que sigue estando presente en nuestros días.

Para entender los procesos de erosión insertos en la micro-cuenca fue necesario el uso de técnicas y métodos confiables y modernos, que en décadas pasadas no se disponían y que limitaban o impedían el desarrollo de una serie de análisis. Es por ello que se aplicaron procedimientos digitales fundamentados principalmente en el avance que han tenido los sistemas de información geográfica (SIG), vinculados a los procedimientos de teledetección, orto-rectificación digital y el sistema de posicionamiento global ampliamente desarrollados en la actualidad, a fin de contestar las interrogantes: ¿Cómo ha sido la evolución de los procesos de erosión? ¿Cuáles son las dimensiones de los procesos presentados a lo largo de los años? y ¿Qué repercusiones han fomentado la dinámica de los mismos *in situ* y aguas abajo de las laderas?

El propósito de esta investigación es responder estas interrogantes, a fin de que su resultado ayude a la generación de propuestas y estrategias que propendan a

la disminución de los procesos de erosión y sus efectos en el futuro.

El planteamiento central de este estudio es analizar la evolución y el grado de los procesos de erosión existentes, a partir de un enfoque de tres niveles, que comprende el uso de fotografías aéreas, ortofotos, imágenes satelitales y recorridos por el área en observación (Larsson y Strömquist, 1995), metodología que fue parcialmente sugerida en 1972, por la Corporación de Los Andes (Corpoandes), (refiriéndose a un estudio multi-temporal con base en fotografías aéreas) como potencialmente interesante para analizar las variaciones de la erosión (Ferrer, 1977) y que lamentablemente no se realizó dado las limitaciones tecnológicas de la época en la que fue propuesta o la falta de continuidad de investigaciones alusivas a la micro-cuenca.

Los estudios de los procesos de erosión, al igual que otros campos dentro de las áreas del saber geográfico o ambiental, ha estado a la par conforme a como se han dado los avances tecnológicos, así pues el hacer científico ha pasado de los procedimientos manuales, laboriosos de orden analógico sobre papel a procesamientos rápidos digitales, como el que ha fomentado los ordenadores modernos.

Existe una gran cantidad de enfoques cuyo objetivo es la cuantificación e inclusive la simulación de los procesos de erosión, especialmente sobre la dinámica, forma, volumen removido en tiempo y espacio, determinación de origen, entre otros. Dichos enfoques podrían clasificarse en cuatro grandes categorías esbozadas aquí a grandes rasgos. La primera

de ellas, encargada de realizar estudios de observación sobre las propias áreas donde ocurre la erosión, muestra de ello son los estudios fotogramétricos de Larson y Strömquist (1995) en África meridional (basados en imágenes satelitales y fotografías aéreas); la segunda categoría simula lo que ocurre cuando hay presencia de procesos de erosión mediante el uso de parcelas que controlan las variables pendiente, tipo de suelo, cobertura y pluviosidad, en laboratorios destinados exclusivamente para ello, ejemplo, el estudio desarrollado en el municipio Uberlândia, Brasil (Junior *et al.*, 2008); tercera, los métodos de cuantificación directa, basada a partir del uso de estacas y/o levantamientos de perfiles altamente detallados de la topografía (Martínez-Casasnovas *et al.*, 2001), y por último, los que se hayan insertos plenamente bajo la forma de programas de computación que recogen y traducen los datos bajo las teorías y criterios científicos comprobados por los círculos de expertos en la materia.

Los SIG pertenecen a esta última categoría, siendo su gran capacidad de representación, análisis y ahorro de tiempo su sello distintivo; procesos laboriosos como la preparación de datos de entrada para el desarrollo de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo conocida por sus siglas en inglés como USLE por ejemplo, realizados de modo analógico, en la actualidad se han visto significativamente reducidos en cuanto al empleo del tiempo.

Bajo este marco se determinó y cartografió los estados, tipos y grados de procesos de erosión presentes en la mi-

cro-cuenca torrencial ‘La Machirí’ en los años 1952, 1976 y 2010, información que coadyuvó al entendimiento de la evolución de los procesos mencionados para los periodos 1952-1976 y 1976-2010 respectivamente.

2. Materiales y métodos

2.1 Área de estudio

La micro-cuenca torrencial ‘La Machirí’ se encuentra al noreste de la ciudad de San Cristóbal, estado Táchira; tiene una extensión aproximada de 20 km²; su altitud varía entre los 800 msnm en la desembocadura en el río Torbes y los 2.214 msnm en el pico ‘El Oso’ (Hopf, 1972). Lo que denota una diferencia altitudinal considerable, que juega un papel determinante en la conformación de la dinámica de los procesos de erosión que allí se desarrollan. La precipitación media anual puede ser superior a los 1.300 mm, distribuida con mayor intensidad entre los meses de abril a noviembre (Hopf, 1972; Uzcátegui, 1975), (Figura 1).

En la zona de estudio afloran rocas pertenecientes a la formación La Quinta y a otras formaciones cretácicas; principalmente imperan rocas pertenecientes a la primera formación mencionada, las cuales poseen un alto porcentaje de arcilla, son muy friables en seco y blandas al humedecerse, pudiéndose fracturar al menor esfuerzo (Hopf, 1972); su color rojo ladrillo a rojo chocolate es muy característico (Petróleos de Venezuela, 2009). Los suelos corresponden a la frac-

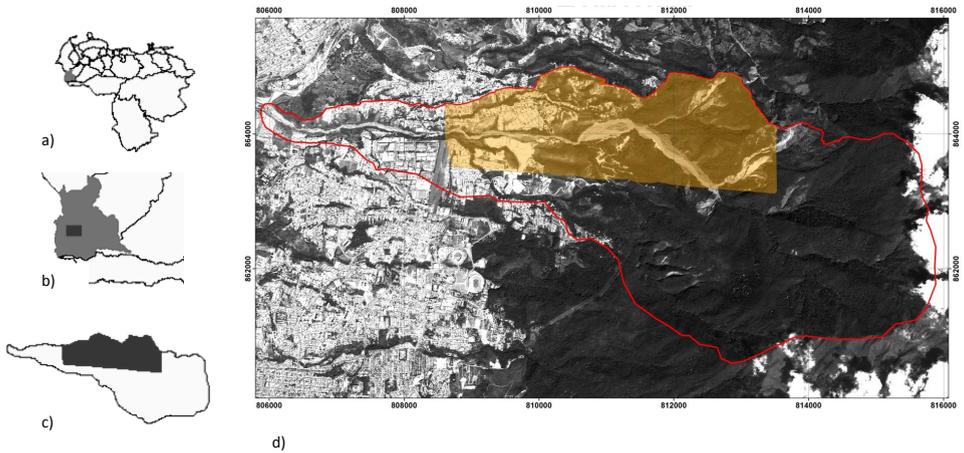


Figura 1. Localización geográfica del área de estudio en la micro-cuenca torrencial 'La Machirí': a) en Venezuela; b) en el estado Táchira; c) en la micro-cuenca; d) área de estudio sobre imagen satelital *Spot-5*

ción textural Franco arcilloso (Montoya, 1976), de pH ácido que, a pesar de poseer poca materia orgánica, constituyen suelos aptos para el desarrollo de algunos rubros agrícolas, que cuentan como principal limitante y debilidad, su alta susceptibilidad a la erosión hídrica (Vivas, 1992).

2.2 Preparación de las imágenes obtenidas por sensores remotos

Se elaboró una ortofoto basada en las fotografías aéreas de la misión 0102121 pertenecientes al año 1976, con un tamaño de pixel de 0,34 m, siguiendo el procedimiento fotogramétrico digital desarrollado por Hernández (2008 y 2008a) que se señala en la figura 2, utilizando el módulo LPS del software *ERDAS IMAGINE 9.2*; seguidamente se georeferenció una fotografía aérea de la misión A-34, mediante el método curvilíneo *Spline* del software

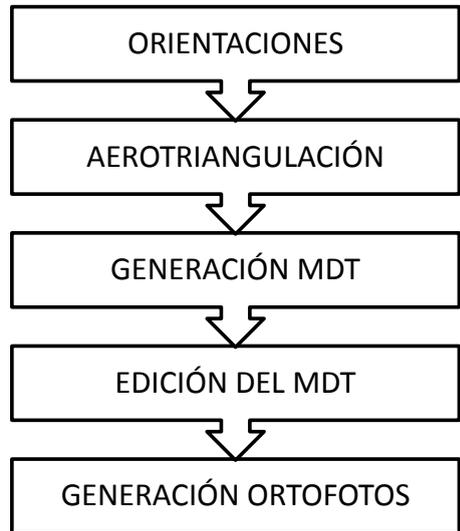


Figura 2. Proceso fotogramétrico (tomado de Hernández, 2008)

ARCGIS con un tamaño de pixel de 10 m, utilizando 19 puntos distinguibles entre la ortofoto y la fotografía aérea. Una descripción detallada del método curvilí-

neo de georeferenciación se encuentra en Moreno (2008) y ESRI (2008).

Finalmente se utilizó un imagen satelital *SPOT-5*, de fecha 15 de diciembre de 2010, con nivel de pre-procesamiento 1A, el cual consiste en la corrección de los errores radiométricos originados en la diferencia de sensibilidad entre los detectores elementales del instrumento de captura de imagen (igualación radiométrica), (*SPOT Image*, 2005B); a dicha imagen se le aplicó la técnica de fusión de imágenes: *Pan Sharpened* ESRI, entre la banda pancromática (2,5 m de tamaño de pixel) y la multiespectral (10 m de tamaño de pixel), a fin de mejorar la habilidad de discriminar información de detalles de un sistema sensor de los objetos presentes (resolución espacial), (Chuvieco, 2008). Posteriormente se realizó una combinación entre las bandas para obtener una composición de color y con ello facilitar la delimitación visual de algunas cubiertas. Para ello, en cada canal (rojo, verde y azul) se asignó una banda distinta de la imagen, generando la combinación 2-1-1, selección que se hizo tomando en cuenta que la imagen *SPOT 5* no cuenta con la banda azul del rango espectral de la luz visible (0,45 - 0,49 μm), con lo cual podría haberse generado una combinación similar a la que perciben nuestros ojos, que se denomina 'color natural' (Chuvieco, 2008).

Teniendo todas las imágenes en el sistema de referencia espacial *WGS84 UTM Zona 18*, se procedió a la creación de los mapas de estado, tipos y grado de la erosión para un área de 6,1 km², equivalente al 30% del área total de la cuenca, don-

de se concentran los graves problemas de erosión (resultado del área abarcada por la ortofoto y coincidente con el resto de imágenes), para los años 1952, 1976 y 2010, constituyendo a su vez un estudio multitemporal de intervalos aproximados de 24 años.

Luego de digitalizados los mapas, se elaboró un análisis inicial de cada uno de los mapas por separado; luego se aplicaron diversas intersecciones entre las diferentes clases generadas a fin de notar los cambios relacionados a los procesos de erosión dentro de la cuenca.

2.3 Evaluación de los estados de los procesos de erosión

Los estados de los procesos de erosión se determinaron en función del criterio de Moreiras *et al.* (2008), quienes definen tres tipos de estado: procesos activos, aquellos que aún están en movimiento, incluyendo la primera rotura y sus reactivaciones; procesos reactivados, aquellos deslizamientos con nuevos eventos luego de ser inactivos y que generalmente se mueven sobre una superficie de rotura pre-existente y procesos inactivos, los que no presentan actividad. En el caso de la elaboración de la cartografía base para 2010, se hizo intervenir aunado a la interpretación visual tanto en pantalla como en campo, el uso del GPS para la constatación de los fenómenos presentados, mediante la correcta localización en campo de los fenómenos observados.

Debido a la no existencia de un registro que señalara los inicios de los procesos de erosión y la magnitud de los mis-

mos, este obstáculo impidió realizar una distinción entre procesos activos y reactivados para el año 1952 y 1976, donde los procesos de erosión se encontraban bastante avanzados, por lo que la señalización del estado del proceso de erosión se vio limitada a solo las categorías procesos activos e inactivos de la metodología empleada; tal solución fue empleada por Ferrer (1977), al toparse con la misma situación en la clasificación de estados de erosión empleada en su estudio geomorfológico. La distinción de estas dos categorías se planteó en función del criterio de usar la cobertura vegetal densa o parcialmente densa (bosques) como indicador de áreas estables o estabilizadas, en contraposición de aquellas áreas descubiertas de vegetación que en conjunción

a la forma presentada (cárcava, surcos, entre otros) señalasen procesos activos.

En cuanto a la clase reactivada, esta pudo ser referenciada para 2010, gracias al estudio entre las áreas existentes con procesos activos que habían pasado a condición de inactivos en 1976 y su retorno a estado activo mostradas por la imagen de 2010.

En el caso de la determinación de los procesos de erosión para el año 1952, se usaron las clases bosques, depósitos con sedimentos, pastos, elementos culturales, erosión activa y sin información. Luego, los rasgos observables en la ortofoto fueron señalados siguiendo la clasificación anterior, con la inclusión de la clase reforestación (Cuadro 1), al denotar la ocupación del suelo para uso residencial

Cuadro 1. Clases desarrolladas para A-34 (1952), ortofoto 0102121(1976) e imagen satelital SPOT (2010)

Clase	Descripción	Color
Bosques	Vegetación arbórea densa y parcialmente densa; se muestra en la fotografía con una textura bastante corrugada y de coloración oscura y en la imagen satelital de coloración verde	Verde
Depósitos de sedimentos	Desprovista de vegetación; se halla en el fondo del valle mostrando un área de deposición de sedimentos. Se observa en la fotografía en coloraciones claras y en la imagen satelital de coloración roja	Naranja
Pastos	Muestra poca o nula vegetación arbórea; está cubierta por gramíneas pudiendo estar asociada a alguna vivienda de medio rural. Se observa en la fotografía con textura lisa y poco corrugado y en la imagen satelital verde claro, gris o color rosáceo	Amarillo
Erosión Activa	Señala los procesos activos de erosión; carece de vegetación de algún tipo; se muestra en coloraciones claras en la fotografía aérea y en la imagen satelital en color rojo	Rojo
Elementos Culturales	Viviendas, carreteras y todo tipo de infraestructura hecha por el hombre. Denota patrón de formas definibles	Cian
Reforestación	Posible reforestación por parte del MAC; muestra patrón homogéneo de puntos oscuros sobre fondo claro	Violeta
Sin información	La fotografía no abarca área en la cuenca	Negro

principalmente, caso contrario a lo mostrado en la fotografía de 1952, donde el uso del suelo era en su mayoría empleado en el uso de parcelas con gramíneas y algunas construcciones de índole rural.

2.4 Determinación de los tipos y grados de erosión

Los tipos y grados de erosión fueron clasificados mediante la aplicación del sistema

SARCCUS (*Southern African Regional Committee for the Conservation and Utilisation of Soil*), desarrollado por Larsson y Strömquist (1995), (empleado en los países de África Meridional), quienes a su vez desarrollaron un sistema para la clasificación de la erosión del suelo por fotointerpretación, que fue modificado más tarde para usarlo con imágenes satelitales; este método busca clasificar los tipos de erosión existente (Cuadros 2 y 3).

Cuadro 2. Clasificación de la erosión laminar de acuerdo al sistema desarrollado por SARCCUS en 1981 (Larsson y Strömquist, 1995)

Tipo de erosión	Grado de erosión	Descripción
Erosión Laminar: Remoción uniforme del suelo superficial	L1: No aparente	Sin signos visibles de erosión en las fotografías aéreas o imágenes satélites: El nivel de manejo parece ser alto
	L2: Leve	Áreas de tono claro se observan en las fotos aéreas. La erosión se deduce por la pobre cobertura vegetal, depósitos de sedimentos y la condición del pie de las plantas (observado en el campo)
	L3: Moderada	Áreas erodadas evidentes en las fotos aéreas. Cubierta vegetal muy pobre y extensos depósitos de sedimentos. Está asociada con pequeños surcos (observados en el terreno)
	L4: Severa	Erosión laminar de tal severidad que siempre está asociada con surcos y cárcavas. La mayor parte o todo el horizonte A del suelo ha sido removido.
	L5: Muy Severa	Como la clase L4. La erosión ocupa la mayor parte del área de la unidad y está asociada con la clase C5 de erosión en cárcavas

Nota: las clases moderada (3) a muy severa (5) a menudo incluyen una combinación de dos o más tipo de erosión hídrica

Cuadro 3. Clasificación de la erosión en cárcavas de acuerdo al sistema desarrollado por SARCCUS en 1981(Larsson y Strömquist, 1995)

Tipo de erosión	Grado de erosión	Descripción
Erosión en cárcavas: Remoción del suelo en grandes canales o cárcavas por escorrentía concentrada proveniente de grandes áreas de captación	L1: No aparente	Igual que para la erosión laminar
	L2: Leve	Claramente observable en fotografías aéreas, usualmente hasta un metro de profundidad. No puede ser cruzada por maquinaria agrícola
	L3: Moderada	Patrón intrincado de cárcavas profundas (principalmente de 1 a 3 m de profundidad) con exposición del perfil completo del suelo en algunos lugares. Muchas 'islas' de remanentes de tope del suelo
	L4: Severa	Paisaje disectado y truncado por grandes cárcavas (de 3 a 5 m de profundidad). 25%- 50% del área es improductiva
	L5: Muy Severa	Cárcavas grandes y profundas (a menudo > 5 m) con denudación total en más del 50% del área

Nota: las clases moderada (3) a muy severa (5) a menudo incluyen una combinación de dos o más tipo de erosión hídrica

3. Resultados

3.1 Análisis inicial (1952-1976-2010)

Un primer análisis basado en la frecuencia presentada por las clases señaladas, permitió observar que el área afectada por los procesos activos de erosión oscilaba en 96,06 ha para el año 1952; luego en 1976 (cuatro años después de la implementación de los medidas técnicas por parte del Ministerio de Agricultura y Cría (MAC) y demás organismos involucrados), el área que mostraba tal problemática se había reducido a 61,57 ha, indicando una recuperación de 34 ha aproximadamente; el estudio de los procesos de erosión en 2010 arrojó como resultado 56,68 ha en estado activo de procesos de erosión, lo que inicialmente permite concluir que la recuperación de las áreas afectadas se logró significativamente a comienzos de los setenta, lográndose muy poco avance en los años siguientes.

En cuanto a los elementos culturales desarrollados por las acciones humanas en el área estudiada, la presencia de éstos era de 0,11 ha en 1952, indicando un carácter eminentemente rural en los mismos, para mostrar un ligero aumento de 5,74 ha en 1976, posibilitado gracias a los procesos de urbanización que ya eran notables para la época, proceso que se mantuvo hasta alcanzar la cantidad de 144,73 ha en 2010; evidentemente esto significó el cambio de uso del suelo de pastos y bosques a elementos culturales.

Como era de suponer, la clase bosques sufrió reducción al pasar de 349 ha

en 1952 a 287 ha en 1976; sin embargo en 2010, los bosques alcanzaron 387 ha, como consecuencia principalmente por la aplicación de la medida de prohibición y restricción de toda actividad humana en las áreas aledañas a las zonas que mostraban los procesos de erosión y a la reforestación desarrollada por el MAC.

Interesante señalar que el área de 9,98 ha de fondo de valle que manifestaban ya la recepción de sedimentos provenientes de los procesos ocurridos tanto en ladera como en cauce en el año 1952, aumentó considerablemente al pasar de esta cifra a la cantidad de 37,33 ha en 1976 y a 54,11 ha en 2010, transformando un fondo de valle con vegetación boscosa a un fondo neto de sedimentos, esto evidencia que el alcance de las medidas desarrolladas no fueron suficientes para frenar un fenómeno que aún sigue estando presente en nuestros días (Figuras 3, 4, 5 y 6).

3.2 Procesos activos 1952-1976

Los procesos de erosión en condición activa habían provocado para 1976, la remoción de 22,49 ha de vegetación boscosa (áreas inmediatas a las cárcavas existentes), manteniendo 34,82 ha de los procesos de erosión activo presentadas en 1952; áreas como parcelas no fueron casi afectadas; resulta perentorio señalar que la falta de un área sin información en la fotografía de 1952, puede hacer aumentar las dimensiones de las áreas encontradas, aunque no significativamente pues esta clase sólo ocupa 3,56 ha (Cuadro 4).

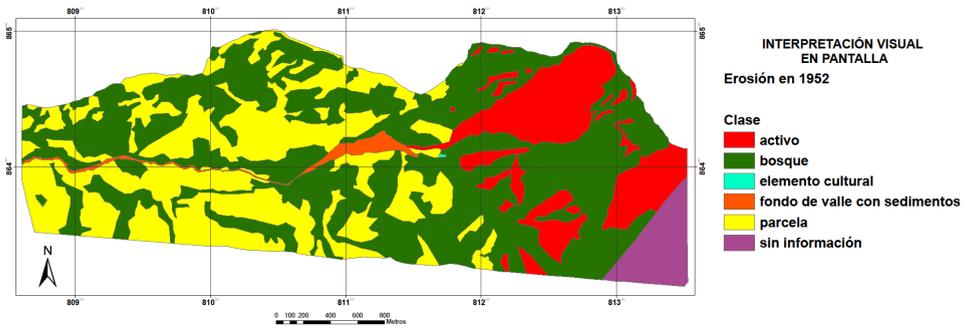


Figura 3. Estado de los procesos de erosión en 1952

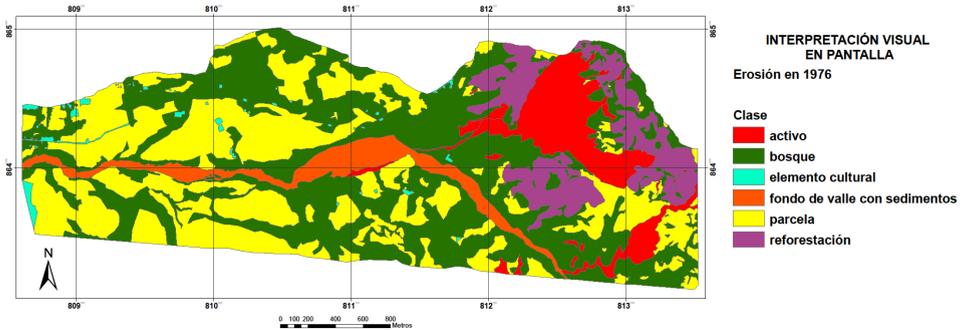


Figura 4. Estado de los procesos de erosión en 1976

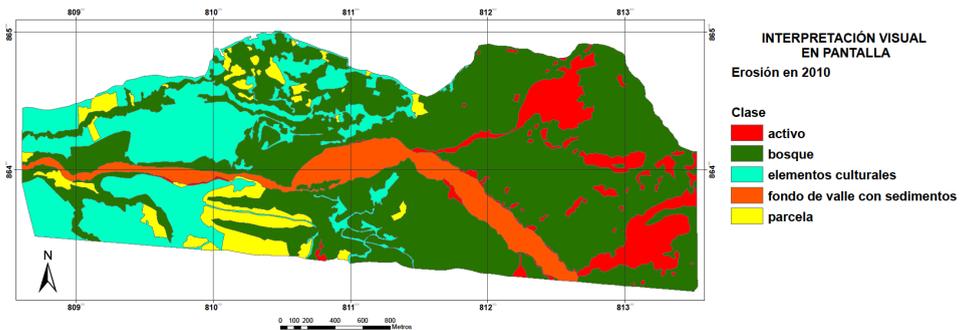


Figura 5. Estado de los procesos de erosión en 2010

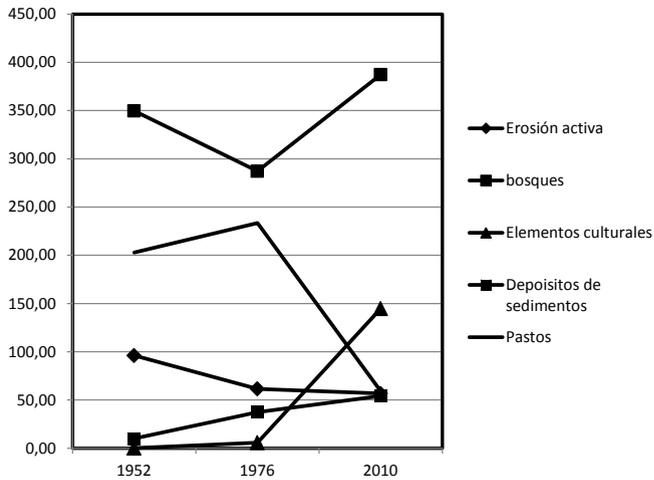


Figura 6. Estado de los procesos de erosión en hectáreas

Cuadro 4. Resultado intersección procesos activos 1976 vs clases 1952

Clase	Área (ha)
Erosión activa	34,82
Bosque	22,50
Depósitos de sedimentos	0,02
Pastos	0,67
Sin información	3,57

3.3 Depósitos de sedimentos 1952-1976

El resultado de la intersección de la clase depósitos de sedimentos con las clases existentes para 1952, permitió concluir que esta área aumentó a causa de la pérdida de 17,76 ha de vegetación boscosa y de 11,30 ha de la clase denominada pastos, tanto por los procesos acaecidos tanto en vertiente como aquellos generados por la socavación horizontal (Cuadro 5).

Cuadro 5. Resultado intersección fondo de valle con sedimentos 1976 vs clases 1952

Clase	Área (ha)
Bosque	17,76
Depósitos de sedimentos	8,27
Pastos	11,30

3.4 Situación de los bosques 1952-1976

En 1976 aún se mantenían 202,74 ha de las existentes en 1952, ocurriendo sustitución de éstas por los procesos de erosión activa (22,46 ha), introducción de elementos culturales (2,16 ha), depósitos con sedimentos (17,76 ha), siendo muy significativo el cambio de uso del suelo a pastos (73,76 ha), (Cuadro 6).

3.5 Procesos activos 1976-2010

Los procesos de erosión activa seguían en 2010 estando presentes en 31,08 ha

Cuadro 6. Resultado intersección bosques 1952 vs clases 1976

Clase	Área (ha)
Erosión activa	22,47
Bosques	202,75
Elementos culturales	2,16
Depósitos de sedimentos	17,72
Pastos	73,63
Sin información	33,22

de las señaladas para esta clase en 1976, afectando a 9,21 ha de bosque existente e igualmente a 10,08 ha de pastos, 6,44 ha que fueron reforestadas en 1976 no alcanzaron su cometido, convirtiendo dicha área en un área con manifestaciones de erosión reactivada (Cuadro 7).

Cuadro 7. Resultado intersección procesos activos 2010 vs clases 1976

Clase	Área (ha)
Erosión activa	31,48
Bosque	9,21
Elementos culturales	0,03
Depósitos de sedimentos	0,28
Pastos	10,08
Reforestación	6,44

3.6 Situación de los bosques 1976-2010

El estudio arrojó para el periodo señalado que 9,21 ha de bosques existentes en 1976, pasaron a convertirse en áreas con problemas de erosión, 208,98 ha se mantuvieron siendo bosques y 53,98 ha fueron deforestadas para convertirse en par-

celas o elementos culturales (Cuadro 8); 54,79 ha reforestadas actualmente son áreas boscosas, señalando de este modo una posible estimación del logro de aplicación de esta medida por parte de los organismos institucionales en los primeros años de la década de los 70 (Cuadro 9).

Cuadro 8. Resultado intersección bosques 1976 vs clases 2010

Clase	Área (ha)
Erosión activa	9,21
Bosque	208,98
Elementos culturales	43,97
Depósitos de sedimentos	15,41
Pastos	10,02

Cuadro 9. Evolución de las áreas reforestadas

Clase	Área (ha)
Erosión activa	6,44
Bosque	54,79
Depósitos de sedimentos	0,07

3.7 Depósitos de sedimentos 1976-2010

El análisis permitió concluir que el fenómeno de presencia y expansión de los procesos de erosión siguen estando activos; para el periodo comprendido 1976-2010, destaca principalmente la pérdida de 15,66 ha de zonas boscosas (Cuadro 10).

3.8 Tipos de erosión 1952

Basados en las limitaciones de la fotografía 804 de la misión A-34, fundamentalmente por su baja resolución espacial, solo se

Cuadro 10. Resultado intersección fondo de valle con sedimentos 2010 vs clases 1976

Clase	Área (ha)
Erosión activa	1,25
Bosques	15,41
Elementos culturales	0,04
Depósitos de sedimentos	35,42
Pastos	1,19
Reforestación	0,07

pudo señalar dos tipos de erosión existente: la erosión concentrada por cárcava con 65,71 ha, y la erosión difusa con 30,34 ha; resulta probable que los procesos señalados como tipo de erosión difusa pudieron ser de otro tipo de erosión, probablemente movimientos de masa (Figura 7).

3.9 Tipos de erosión 1976

La aplicación de la clasificación de los tipos de procesos de erosión existentes en el área de estudio, generó como resultado la presencia casi absoluta de los procesos de tipo concentrado denominados ‘cárcavas’ (56,81 ha); no se pudo determinar el tipo ‘surco’ de los procesos concen-

trados, al no ser observables en la escala 1:10.000 empleada; sin embargo, en una escala mayor éstos serían divisibles. Seguidamente a ‘cárcavas’, los procesos de ‘erosión difusa’ ocuparon el segundo lugar en cuanto a extensión se refiere, alcanzando 3,45 ha. Sólo se pudo determinar un área por movimientos de masa de tipo deslizamiento, manifestado en un área de 0,24 ha y se incluyó en el mapa dos áreas sometidas a socavación horizontal propia de los procesos de erosión en cauce, las cuales suman entre ambas 1 ha aproximadamente (Figura 8).

3.10 Tipos de erosión 2010

El estudio aplicado sobre la imagen satelital SPOT-5 y constatado por medio de la visita a campo, arrojó como resultado la existencia de 44,87 ha con presencia de erosión concentrada de tipo cárcava; 9,10 ha de tipo difusa; 0,73 ha por movimientos de masa y aproximadamente 2 ha sometidas a procesos propios de cauce como lo es la socavación horizontal cuando aumentan los caudales en eventos lluviosos (Figura 9).

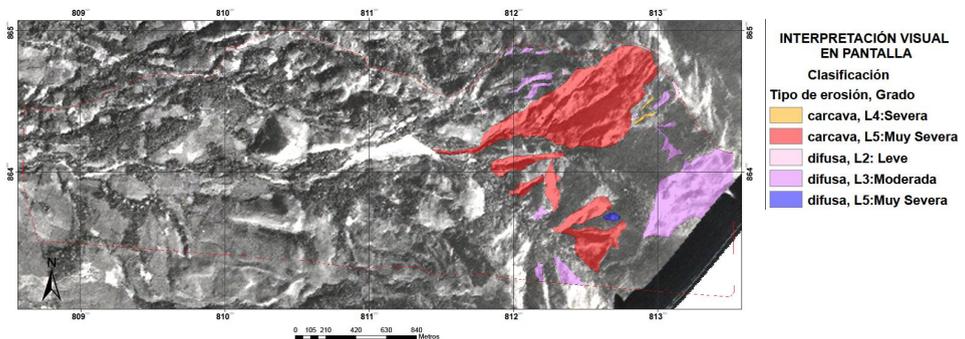


Figura 7. Tipo y grado de los procesos de erosión en 1952

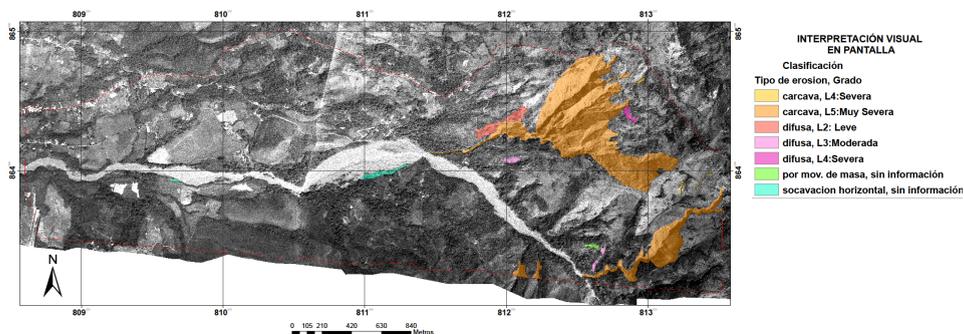


Figura 8. Tipo y grado de los procesos de erosión en 1976

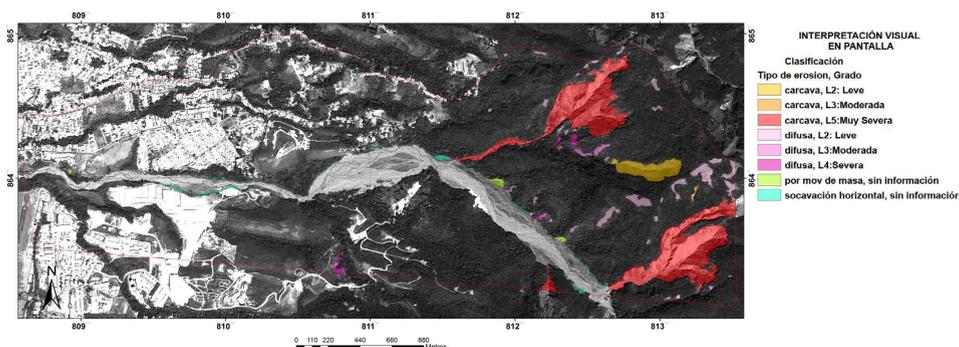


Figura 9. Tipo y grado de los procesos de erosión en 2010

3.11 Grado de los procesos de erosión

La interpretación visual arrojada utilizando el método *SARCCUS* para la determinación de los grados de erosión existente tanto para erosión difusa como para cárcavas, significó en primer lugar, la imposibilidad de poder definir la categoría 'L1: No Aparente' en los años 1952, 1976 y 2010, pues no se presentaron signos visibles de erosión en las fotografías aéreas o la imagen satelital que se pudieran determinar. Los grados determinados para el año 1952, dieron como resultado la preponderancia del grado

'L5: Muy Severa' en las cárcavas con una extensión de 65,15 ha, seguido por la erosión difusa en condición 'L3: Moderada' con 29,19 ha (Figura 7).

En cuanto al grado de los procesos de erosión en 1976, nuevamente el grado 'L5: Muy Severa' en las cárcavas con una extensión de 56,36 ha se situó como el resultado mayoritario, seguido por la erosión difusa 'L2: Leve' con apenas 2,15 ha; la reducción en todos los grados de los procesos de erosión existente se produjo principalmente por la aplicación de los procesos de reforestación en el primer lustro de la década de los setenta (Figura 8).

Finalmente en 2010, los procesos en cárcavas en grado 'L5: Muy Severa', disminuyeron hasta situarse en un área de 39,99 ha; los procesos en cárcavas en grado 'L2: Leve' ocuparon 4,69 ha. Si bien es cierto que los procesos de erosión en general se han reducido a lo largo de 50 años, los procesos de erosión difusa, en diversos grados de presentación, han seguido estando presentes, pues aún hay zonas que muestran la pérdida de vegetación sin presentar problemas más agudos como la erosión de tipo concentrada o la ocasionada por movimientos de masa (Figura 9).

4. Conclusiones y recomendaciones

La aplicación de metodologías tanto cualitativas como cuantitativas permitió determinar el estado, tipo y grado de los procesos de erosión manifestados en el área, mediante la utilización de recursos modernos como los SIG y los software fotogramétricos digitales (SFD).

La información digital obtenida, aparte de ser usada en la consecución de estudios posteriores en aras de información adicional, podrá servir de base para la toma de decisiones futuras tanto en el área como en cuencas circunvecinas que denoten proceso homólogos de erosión.

Se pudo comprobar que los procedimientos de edición manual basada en interpretación visual resultaron inevitables de emplear, condición que minimiza los méritos de los procesos automáticos.

Se sugiere la aplicación de metodologías que ayuden a contribuir en el análisis de los procesos acaecidos y aún existentes en el área a partir de la aplicación de metodologías como las ecuaciones para la estimación de la pérdida de suelo (ejemplo *USLE*, *MUSLE* O *MUST*), la susceptibilidad en la misma (*TC Sheng* o *IRE*).

Pocos estudios han abordado el problema de los procesos de erosión de modo específico; este trabajo buscó llenar los vacíos relacionados con el tema, mediante la aplicación de metodologías como las sugeridas por Corpoandes en 1972 y las aplicadas en África Meridional entre otras, así como también de los avances tecnológicos, principalmente posibilitados por la existencia de software fotogramétricos y los sistemas de información geográfica.

Finalmente, resulta perentorio que se realicen evaluaciones periódicas en la parte alta de la cuenca (área que denotó los grandes fenómenos de erosión y que en la década de los 70 fue tratada mediante diversas estrategias por los entes encargados para su recuperación), por las instituciones Ministerio del Poder Popular para el Ambiente (MPPA) y Guardia Nacional, dado que la población se ha incrementado, lo que ha ocasionado nuevas intervenciones en el área, principalmente por la construcción y ampliación de viviendas y la deforestación para la constitución de nuevos caminos y veredas.

5. Referencias citadas

- CHUVIECO, E. 2008. **Teledetección ambiental. La observación de la Tierra desde el espacio**. Ariel Ciencia. Barcelona-España. 586 p.
- ESRI. 2008. *ArcGis Desktop Help: Find the volume contained in a surface*. Disponible en: http://webhelp.esri.com/ARCGISDESKTOP/9.2/index.cfm?TopicName=Find_the_volume_contained_in_a_surface. [Consulta: Julio 18, 2009].
- FERRER, C. 1977. **Estudio geomorfológico detallado de la cuenca media-inferior del río Torbes, estado Táchira**. Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Universidad de Los Andes. Mérida-Venezuela. 180 p.
- HERNÁNDEZ, L. 2008. **Proyecto fotogramétrico digital. Universidad Distrital Francisco José de Caldas**. Bogotá-Colombia. 179 p.
- HERNÁNDEZ, L. 2008a. **Procesos de fotogrametría digital. Universidad Distrital Francisco José de Caldas**. Bogotá-Colombia. 69 p.
- HOPF, J. 1972. *Proyecto conservacionista y corrección de la cuenca La Machirí, San Cristóbal Edo. Táchira*. Corporación de los Andes-Ministerio de Agricultura y Cría. 44 p. Mérida-Venezuela.
- JUNIOR, J.; CRUZ, L.; NOGUEIRA, T. y S. RODRIGUEZ. 2008. *Monitoramento de processos erosivos em parcelas experimentais no município de Uberlândia, mg*. **Revista Geográfica Académica**. v.2 n.3 (xii.2008): 5-18.
- LARSSON, R. y L. STRÖMQUIST. 1995. **Monitoreo del Medio Ambiente con análisis de imágenes satelitarias**. Tryckkontakt, Uppsala-Suecia. 97 p.
- MARTÍNEZ-CASASNOVAS, J.; RAMOS, M. & M. RIBES-DASI. 2001. *Soil erosion caused by extreme rainfall events: mapping and quantification in agricultural plots from very detailed digital elevation models*. **Journal Geoderma**. 105 (2002): 125-140.
- MONTOYA, J. 1976. *Aspectos técnicos generales a realizarse dentro de las actividades en el proyecto 'La Machirí'*. Facultad de Ciencias Forestales y ambientales, Universidad de Los Andes. Mérida-Venezuela. Informe de pasantía, (inédito). 42 p.
- MORENO, A. 2008. **Sistemas de información geográfica. Manual de autoaprendizaje con ArcGIS**. Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V. México. 911 p.
- MOREIRAS, S.; LENZANO, M. y N. RIVEROS. 2008. *Inventario de procesos de remoción en masa en el Parque Provincial Aconagua, provincia de Mendoza-Argentina*. **Multequina Latin American Journal of Natural Resources**. (17): 129-146.
- PETRÓLEOS DE VENEZUELA (PDVSA). 2009. *Código estratigráfico de las cuencas petroleras de Venezuela*. Disponible en: <http://www.pdv.com/lexico/l38w.htm>. [Consulta: Julio 15, 2009].
- UZCÁTEGUI, F. 1975. *Canales y diques en la micro-cuenca Los Pinos-La Machirí (San Cristóbal)*. Ministerio de Agricultura y Cría. Informe técnico. Mérida-Venezuela. 63 p.
- VIVAS, L. 1992. **Los Andes Venezolanos**. Academia Nacional de la Historia. Caracas-Venezuela. 250 p.