

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
Facultad de Filosofía y Letras
División de Estudios de Posgrado
Departamento de Geografía

m/ 211348

**EVALUACIONES GEOMORFOLÓGICAS Y DE
RECURSOS NATURALES APLICANDO UN SISTEMA DE
INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (ILWIS)**



BIBLIOTECA
DR. JORGE A. VIVO



XG
1994
LOPb

T E S I S
Que para obtener el Grado de
DOCTOR EN GEOGRAFÍA
p r e s e n t a
Jorge López Blanco

Director de tesis: Dr. José Luis Palacio-Prieto

FYLTEJ: 5624

Revisores:
Dr. Mario Arturo Ortiz-Pérez
Dra. Ma. de Lourdes Villers-Ruiz

Sinodales:
Dr. Román Alvarez-Béjar
Dr. Gerardo Bocco-Verdinelli
Dr. Juan Carlos Gómez-Rojas
Dr. Valentino Sorani-Dal Bon

México, D.F., 1994



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

Facultad de Filosofía y Letras

División de Estudios de Posgrado

Departamento de Geografía

**EVALUACIONES GEOMORFOLÓGICAS Y DE
RECURSOS NATURALES APLICANDO UN SISTEMA DE
INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (ILWIS)**



T E S I S

Que para obtener el Grado de

DOCTOR EN GEOGRAFÍA

p r e s e n t a

Jorge López Blanco

Director de tesis: Dr. José Luis Palacio-Prieto

México, D.F., 1994

Esta tesis la dedico a Lourdes, Jorge Alberto, Alejandro y Andr a,
con amor, gratitud y esperanza

CONTENIDO

	Pág.
0.1. INTRODUCCIÓN GENERAL.	1
0.1.1. Objetivo general.	1
0.1.2. Definiciones de Sistema de Información Geográfica.	2
0.2. ANTECEDENTES Y CONCEPTOS GENERALES SOBRE LOS SIG.	4
0.2.1. Requerimientos que debe cumplir un SIG.	5
0.2.2. Elementos básicos que conforman un SIG.	5
0.2.3 Principales niveles de complejidad de análisis realizados con un SIG.	8
0.3. LOS SIG COMO HERRAMIENTAS PARA LA PLANIFICACIÓN DEL MEDIO AMBIENTE Y EL APROVECHAMIENTO DE LOS RECURSOS NATURALES.	11
0.4 INSTITUCIONES, USUARIOS Y PRINCIPALES CAMPOS EN QUE SE HAN APLICADO LOS SIG.	15
0.5. CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA UTILIZADO EN LAS APLICACIONES QUE SE PRESENTAN EN LA TESIS.	17
0.6. INTRODUCCIÓN A LOS ESTUDIOS DE CASO.	19
ESTUDIO DE CASO 1. EVALUACIÓN DEL CRECIMIENTO DE CABECERAS EN CÁRCAVAS MEDIANTE EL PROCESAMIENTO DE IMÁGENES MULTITEMPORALES DE VIDEO OBTENIDAS DESDE UN GLOBO AEROSTÁTICO: EL CASO DE HUASCA, HIDALGO.	
1.1 INTRODUCCIÓN.	21
1.2 ANTECEDENTES.	23
1.2.1 Referencias de trabajos relacionados con la cuantificación a detalle del avance de la erosión y con inventarios de erosión.	23
1.2.2 Antecedentes en el uso de imágenes de video y algunas referencias básicas en Videografía.	27
1.2.3 Aplicaciones de imágenes de video en la evaluación de recursos naturales y medio ambiente.	30
1.2.4 Referencias relacionadas con la utilización de globos aerostáticos y fotografía aérea convencional en estudios de sitios arqueológicos.	32
1.3 OBJETIVO E HIPÓTESIS.	32
1.4 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA EN ESTUDIO.	32
1.5 METODOLOGÍA.	36
1.6 FASE DE DISEÑO EXPERIMENTAL.	39
1.6.1 Determinación de áreas de muestreo.	39
1.6.2 Diseño y construcción del globo aerostático.	40
1.6.3 Selección y características de la cámara de video utilizada.	42
1.7 FASE DE OBTENCIÓN DE LA INFORMACIÓN.	45
1.7.1 Realización del levantamiento topográfico y el cálculo de coordenadas de los puntos de control utilizados para las imágenes.	45
1.7.2 Preparación del globo, cámara y marcas topográficas en el sitio, realización de los vuelos y registro de imágenes.	50
1.7.3 Condiciones de tiempo atmosférico durante la realización del vuelo con el globo aerostático.	52
1.8 FASE DE SELECCIÓN Y DIGITIZACIÓN DE LAS IMÁGENES (ENTRADA DE LA INFORMACIÓN AL SIG).	53
1.9 FASE DE PROCESAMIENTO PARA EL ANÁLISIS DE LAS IMÁGENES DENTRO DEL SIG.	54
1.9.1 Procesamiento digital preliminar en el SIG, de las imágenes seleccionadas (Realce, revisión y "estiramiento" de histogramas, asignación de colores).	54
1.9.2 Asignación de coordenadas	55
1.9.3 Medida de la distorsión producida por la lente de la cámara de video y la deformación resultante en las imágenes obtenidas. Método de calibración de la cámara de video empleada.	57
1.9.4 Resultados de aplicar el método de calibración.	67
1.9.5 Corrección geométrica de las imágenes.	73

1.9.6 Digitización en pantalla de los límites de las cabeceras de las cárcavas.	75
1.9.7 Generación de polígonos a partir de los límites de cabecera digitizados en pantalla para todas las fechas de las imágenes utilizadas.	78
1.10. FASE DE RESULTADOS, INFORMACION DE SALIDA, VALIDACION DEL METODO Y COMPARACION CON MEDICIONES DIRECTAS.	78
1.10.1 Evaluación del avance de la erosión en las cabeceras de los sistemas de cárcavas 1 y 2 y determinación de áreas afectadas.	78
1.10.2 Comparación de los resultados obtenidos en las imágenes en relación con mediciones hechas en el campo. Procedimiento y resultados.	81
1.11. DISCUSION Y CONSIDERACIONES FINALES.	87
1.12 CONCLUSIONES	96

ESTUDIO DE CASO 2. EVALUACIÓN DE CAMBIOS EN EL USO AGRÍCOLA Y FORESTAL DEL SUELO EN EL CONTEXTO DE UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA: EL CASO DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO TEMASCALTEPEC, NEVADO DE TOLUCA.

2.1 INTRODUCCION	99
2.2 ANTECEDENTES	100
2.2.1 Objetivos.	100
2.2.2 Hipótesis.	100
2.2.3 Descripción de las características del área en estudio.	101
2.3 METODOLOGIA	107
2.3.1 Entrada de la información básica y procesamiento preliminar.	110
2.3.2 Reclasificación y sobreposiciones para la obtención de los mapas finales.	110
2.4 RESULTADGS POR TEMAS	113
2.4.1 Intervalos altitudinales y uso del suelo.	113
2.4.2 Características de las áreas agrícolas en relación a las comunidades.	114
2.4.3 Características de la pendiente media de las áreas agrícolas en relación a las comunidades.	115
2.4.4 Características dimensionales de los predios considerados oficialmente como potencialmente forestales.	115
2.4.5. Diferencias y tipos de cambio de uso del suelo 1972-1988.	118
2.5 RESULTADOS GENERALES Y DISCUSIÓN	121
2.6 CONCLUSIONES	123

ESTUDIO DE CASO 3. REGIONALIZACIÓN ECOLÓGICA Y ORDENAMIENTO TERRITORIAL EN EL MUNICIPIO DE LOS CABOS, BAJA CALIFORNIA SUR, MÉXICO, UTILIZANDO UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.

3.1 INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES.	125
3.1.1 Regionalización ecológica.	126
3.1.2 El enfoque geomorfológico.	126
3.1.3 Objetivos.	127
3.1.4 Hipótesis.	127
3.2 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA EN ESTUDIO.	127
3.2.1 Medio ambiente biofísico.	129
3.2.2 Medio ambiente humano.	131
3.3 ANTECEDENTES GEOMORFOLÓGICOS.	131
3.4 CONCEPTOS: TÉRMINOS Y JERÁRQUÍAS	134
3.5 METODOLOGÍA.	136
3.5.1 Sistema de Información Geográfica	137
3.5.2 Descripción del método empleado.	137
3.6 RESULTADOS.	140
3.7 CONCLUSIONES.	147

CONCLUSIONES GENERALES	148
BIBLIOGRAFIA	152
APENDICE A: Estudio de caso 1	171
APENDICE B: Estudio de caso 2	197
APENDICE C: Estudio de caso 3	200

INDICE DE FIGURAS, TABLAS, FOTOGRAFIAS Y CUADROS.

Figuras

- Figura 0.1 Sitio que ocupa un SIG dentro de una estructura de organización para la planificación.
- Figura 0.2 Los SIG como herramientas para la planificación del medio ambiente.
- Figura 1.1. Mapa de localización del área en estudio, Huasca, Hgo.
- Figura 1.2. Localización específica del área en estudio.
- Figura 1.3. Esquema de la metodología empleada para la obtención, y procesamiento de las imágenes de video.
- Figura 1.4 Localización de los puntos de control topográfico para el Sistema de Cárcavas 1.
- Figura 1.5 Localización de los puntos de control topográfico para el Sistema de Cárcavas 2.
- Figura 1.6 Obtención de los valores de los ángulos interiores, de los triángulos.
- Figura 1.7. Marca de referencia para las imágenes de video.
- Figura 1.8 Diferencias en cubrimiento, distancias de recorrido y oblicuidad de los rayos de luz.
- Figura 1.9 Imagen de calibración Toma 1 (D1T2 17/Feb/1993).
- Figura 1.10 Procedimiento de *edición de píxeles*.
- Figura 1.11 Mapa de puntos de control para la imagen de calibración Toma 1 (D1T2/17/Feb/1993).
- Figura 1.12 Diferencias al comparar distancias radiales, con respecto a las de cuadrícula Toma 1 (D1T2/17/Feb/1993).
- Figura 1.13 Intervalos de diferencias al comparar distancias radiales con respecto a las de cuadrícula Toma 1 (22/May/1993).
- Figura 1.14 Intervalos de diferencias al comparar distancias radiales con respecto a las de cuadrícula Toma 2 (22/May/1993).
- Figura 1.15 Intervalos de diferencias al comparar distancias radiales con respecto a las de cuadrícula.
- Figura 1.16 Ecuaciones de curvas polinomiales de mejor ajuste, para las *Imágenes de Calibración*.
- Figura 1.17 Modelo tridimensional de diferencias entre las distancias radiales con respecto a las de cuadrícula.
- Figura 1.18 Histograma de frecuencias de las diferencias entre las distancias radiales con respecto a las *I.de Calibración*.
- Figura 1.19 Límite inicial de la cabecera de la Cárcava II del Sistema 1.
- Figura 1.20 Límite de la cabecera de la Cárcava II del Sistema 1 segunda fecha.
- Figura 1.21 Límite de la cabecera de la Cárcava II del Sistema 1 tercera fecha.
- Figura 1.22 Límite de la cabecera de la Cárcava II del Sistema 1 cuarta fecha.
- Figura 1.23 Límite de la cabecera de la Cárcava II del Sistema 1 quinta fecha.
- Figura 1.24 Imagen del Sistema de Cárcavas 2.
- Figura 1.25 Límite inicial de las cabeceras de cárcavas del área de seguimiento del Sistema 2.
- Figura 1.26 Límite de las cabeceras de cárcavas del área de seguimiento del Sistema 2 segunda fecha.
- Figura 1.27 Límite de las cabeceras de cárcavas del área de seguimiento del Sistema 2 tercer fecha.
- Figura 1.28 Longitudes máximas de avance en la cabecera de la Cárcava II del Sistema 1.
- Figura 1.29 Longitudes máximas de avance en las cabeceras de cárcavas del área de seguimiento del Sistema 2.
- Figura 1.30 Diferencias entre los límites de la cárcava con respecto a las mediciones directas a cada 30 cm. 29 de junio de 1991.
- Figura 1.31 Diferencias entre los límites de la cárcava con respecto a las mediciones directas a cada 30 cm. 24/08/1991.
- Figura 1.32 Diferencias entre los límites de la cárcava con respecto a las mediciones directas en campo a cada 30 cm. 14 de julio de 1992.
- Figura 1.33 Par estereoscópico del Sistema de Cárcavas 1.
- Figura 1.34 Par estereoscópico del Sistema de Cárcavas 2.
- Figura 1.35a Diferentes resoluciones espaciales de las imágenes. Tomada desde 14 m.
- Figura 1.35b Diferentes resoluciones espaciales de las imágenes. Tomada desde 21 m.

Figura 1.35c Diferentes resoluciones espaciales de las imágenes. Tomada desde 57 m.
 Figura 1.35d Diferentes resoluciones espaciales de las imágenes. Tomada desde 106 m.
 Figura 1.35e Diferentes resoluciones espaciales de las imágenes. Tomada desde 198 m.
 Figura 2.1 Mapa de localización, Cuenca Alta del Río Temascaltepec, Nevado de Toluca.
 Figura 2.2 Intervalos de altitudes en la Cuenca Alta del Río Temascaltepec, Nevado de Toluca.
 Figura 2.3 Áreas agrícolas agrupadas por comunidad.
 Figura 2.4 Metodología empleada para la caracterización física de las áreas agrícolas y forestales.
 Figura 2.5 Intervalos de pendiente media para áreas con uso agrícola del suelo.
 Figura 2.6 Porcentaje de bosque para los predios forestales.
 Figura 2.7 Uso del suelo y vegetación para 1972, Cuenca Alta del Río Temascaltepec, Nevado de Toluca.
 Figura 2.8 Uso del suelo y vegetación para 1988, Cuenca Alta del Río Temascaltepec, Nevado de Toluca.
 Figura 2.9 Porcentaje de diferencias y similitudes por uso del suelo para el período 1972-88.
 Figura 2.10 Tipo de cambio de uso del suelo para el período 1972-88.
 Figura 3.1 Localización del área y unidades ambientales físicas.
 Figura 3.2 Vista tridimensional del mapa de relieve sombreado.
 Figura 3.3 Diagrama metodológico de la aplicación del enfoque geomorfológico para la delimitación de unidades.
 Figura 3.4 Mapa de unidades ambientales físicas, sistemas ecogeográficos y paisajes terrestres.

Tablas

Tabla 0.1 Definiciones seleccionadas del significado de los SIG.
 Tabla 0.2 Principales niveles de complejidad de análisis utilizando un SIG
 Tabla 0.3 Las tres grandes categorías de campos de aplicación de los SIG.
 Tabla 1.1 Comparación de costos de productos digitales: obtenidos desde satélites, fotografía aérea y videografía.
 Tabla 1.2 Especificaciones técnicas de la cámara de video Sony Handycam CCD-TR55.
 Tabla 1.3. Áreas de cubrimiento en relación a la altura de vuelo para una cámara de video.
 Tabla 1.4 Valores de alturas relativas para los puntos de control topográfico.
 Tabla 1.5 Valores de σ obtenidos en la asignación de coordenadas a las imágenes de la cárcava II del Sist.1.
 Tabla 1.6 Valores de σ obtenidos en la asignación de coordenadas de las imágenes del Sistema de cárcavas 2.
 Tabla 1.7 Errores sistemáticos de varios orígenes considerados para fines de producción fotogramétrica.
 Tabla 1.8 Metodología empleada en la determinación de la distorsión.
 Tabla 1.9 Longitudes medias de los lados de la cuadrícula de la porción central de las imágenes.
 Tabla 1.10 Coeficientes de las ecuaciones polinomiales de mejor ajuste para cada conjunto de datos de las *I.de Calibración*.
 Tabla 1.11 Comparación de distancias entre puntos de control en las imágenes *no corregidas* y las *reales* Sist.1.
 Tabla 1.12 Comparación de distancias entre puntos de control en las imágenes *corregidas* y las *reales* Sistema 1.
 Tabla 1.13 Comparación de distancias entre puntos de control en las imágenes *no corregidas* y las *reales* Sist.2.
 Tabla 1.14 Comparación de distancias entre puntos de control en las imágenes *corregidas* y las *reales* Sistema 2.
 Tabla 1.15 Avance de la erosión en cárcavas, mediciones realizadas en imágenes de la Cárcava II del Sistema 1.
 Tabla 1.16 Avance de la erosión en cárcavas, mediciones realizadas en imágenes del Sistema 2
 Tabla 1.17 Avance de la erosión en cárcavas, mediciones realizadas en campo, comparándolas con las de imágenes de la Cárcava II del Sistema 1.
 Tabla 1.18 Ventajas y desventajas del uso de imágenes de video en la evaluación de la erosión de suelos.
 Tabla 2.1 Asociaciones de vegetación correspondientes a intervalos altitudinales.
 Tabla 2.2 Porcentaje de uso del suelo con respecto a intervalos altitudinales para 1988.
 Tabla 2.3 Valores de superficie media de áreas agrícolas por comunidad.
 Tabla 2.4 Valores de pendiente media en áreas agrícolas por comunidad.
 Tabla 2.5 Características dimensionales de los predios para explotación forestal.
 Tabla 3.1 Estructura jerárquica de la regionalización ecológica con fines de ordenamiento territorial.
 Tabla 3.2 Tarjeta de Descripción geomorfológico-ambiental para caracterizar las unidades de paisaje terrestre.
 Tabla 3.3 Descripción biofísica de las unidades de paisaje terrestre.
 Tabla 3.4 Clave, nombre, superficie y porcentaje para cada uno de los paisajes terrestres delimitados.

Cuadro

Cuadro 2.1 Estaciones hidrométricas ubicadas en el interior de la Cuenca Alta del Temascaltepec.

Fotografías

- Foto 1.1. Fase terminal del proceso de erosión acelerada de suelos.
Foto 1.2. Se muestra la cabecera de la cárcava de uno de los sistemas evaluados.
Foto 1.3. Se muestra el globo aerostático empleado.
Foto 1.4. Probando el buen funcionamiento de la cámara antes de la ascensión del globo.
Foto 1.5 Actividades durante el trabajo de campo topográfico.
Foto 1.6 Cabecera cárcava I del sistema 1 con los cuadrados de cartón blanco situados sobre los puntos de control.
Foto 1.7 Tomando imágenes de la cuadrícula de referencia para la cuantificación de la deformación.
Foto 2.1 Límite entre el zacatonal alpino y el bosque de *Pinus hartwegii*, a 4,040 msnm.
Foto 2.2 Extracción de resinas de los bosques de *Pinus spp.*, en el área del Parque Nacional Nevado de Toluca.
Foto 2.3 Tala de árboles en el bosque de *Pinus hartwegii*, en la Cuenca Alta del Río Temascaltepec.
Foto 2.4 Uso agrícola, pecuario y forestal del suelo en el área de San Andrés de los Gama.
Foto 3.1 Laderas S y SW de la Sierra de La Laguna, formada por montañas bloque de rocas cristalinas.
Foto 3.2 Laderas occidentales de la porción sur de la Sierra de La Trinidad.
Foto 3.3 Planicie aluvial del Río Pocitos a 3 km al suroeste de la localidad La Rivera.
Foto 3.4 Planicie del Río Migriño.
Foto 3.5 Cañon de San Dionisio dentro de la Sierra de La Laguna.
Foto 3.6 Lomerío cercano a la costa, 10 km hacia el NE de San José.
Foto 3.7 Lomeríos y montañas bajas de rocas volcánicas del Neógeno, en la Sierra de La Trinidad.
Foto 3.8 Campo de dunas litorales del Cuaternario, a 5 km al poniente de Cabo san Lucas.



BIBLIOTECA
DR. JORGE A. VIVO

RECONOCIMIENTOS

Quiero hacer patente mi más amplia y sincera gratitud, para las siguientes personas, cuya contribución ha sido fundamental para la realización de esta investigación:

Al Dr. José Luis Palacio Prieto por su estímulo académico para iniciarme en el camino de la ciencia geomorfológica y de los sistemas de información geográfica, primero como profesor, luego como compañero en investigaciones, ahora como director de tesis, pero siempre como amigo. Agradezco sus críticas constructivas y sugerencias, las cuales han permitido abrir nuevos caminos para continuar este estudio.

Al Comité de sinodales, Doctores: José Luis Palacio Prieto, Mario Arturo Ortiz Pérez, María de Lourdes Villers Ruiz, Gerardo Bocco Verdinelli, Román Álvarez Bejar, Juan Carlos Gómez Rojas y Valentino Sorani-Dal Bon, quienes con sus atinadas sugerencias ayudaron a mejorar sustancialmente el contenido del escrito final.

A Lourdes Villers, por hacerme partícipe de su experiencia dentro de los estudios de ordenamiento territorial, y por invitarme a colaborar en los proyectos Nevado y Los Cabos.

A Gerardo Bocco por sus comentarios acerca del sentido teórico metodológica de esta tesis y por su amistad.

A Lorenzo Vázquez por compartir sus hallazgos acerca de las condiciones de los procesos erosivos en los suelos de Huasca.

A los geógrafos Laura Luna, Isabel Ramírez, Josefina Hernández, Ivonne Valdéz, Jesús Ugalde y Angeles García, durante la realización de los vuelos con el globo, el trabajo de campo en Huasca y por su apoyo durante la digitización de la cartografía.

A Alfredo Cortés y esposa, Diana Otero y Héctor Celedón, por su apoyo en el trabajo de campo.

Al grupo de *Geomorfología Aplicada* (semestre 89-II Colegio de Geografía, FFyL, UNAM) por su apoyo entusiasta durante los primeros vuelos experimentales y durante el trabajo topográfico.

A Lourdes Villers, Irma Trejo y Pedro Tenorio por sus comentarios y por los buenos momentos durante el trabajo de campo realizado en Los Cabos, B.C.S.

A Ricardo y Armando Peralta, por habernos facilitado el equipo, programas e información para realizar la digitización de las imágenes de video.

A las autoridades del Instituto de Geografía de la UNAM, por haberme facilitado en todo momento la infraestructura y el equipo necesarios para realizar esta investigación.

A las autoridades de la Universidad de Colima por el apoyo económico aportado durante la primera fase de esta investigación.

A las autoridades de la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA) de la UNAM, por haberme brindado el apoyo económico necesario durante la fase final de la elaboración de esta tesis.

A Lulú por supuesto, por sus ojos y su sonrisa.

Jorge López Blanco, Agosto 1994

EVALUACIONES GEOMORFOLOGICAS Y DE RECURSOS NATURALES APLICANDO UN SISTEMA DE INFORMACION GEOGRAFICA (ILWIS)

0.1 INTRODUCCIÓN GENERAL

El avance computacional de las últimas décadas y la generación, desarrollo y aplicación de la tecnología conocida como *Sistemas de Información Geográfica* (SIG ó GIS por sus siglas en inglés) han permitido su utilización en el campo de los estudios de recursos naturales y del medio ambiente, tanto en el mundo, a partir de los años 70's principalmente, como en México, en los últimos años.

Esto ha conducido a que se reconsideren cada vez más los conceptos teóricos y las metodologías geográficas que se habían utilizado hasta ahora. Debido a que el empleo de esta tecnología permite integrar y analizar gran cantidad de información de naturaleza espacial y no espacial, que hasta hace poco tiempo era muy difícil o imposible hacer, de manera "*manual*" o mediante "*interpretación visual*".

El término Sistema de Información Geográfica (SIG, Geographical Information System, GIS y Geographic Information System este último usado en Norteamérica) se aplica frecuentemente a la: "*tecnología computacional orientada hacia asuntos geográficos*". También se le llama así a los "*conceptos y estructuras lógicas de manejo de entidades espaciales o geográficas (programas)*" usados en diferentes áreas de aplicación", y más recientemente, a un "*cuerpo organizado de conocimientos sistemáticos sobre las diversas formas de guardar, integrar y analizar la información acerca de entidades geográficas*", lo cual está permitiendo la estructuración de una nueva disciplina, de corte tecnológico y de establecimiento de teorías sobre el análisis espacial y de los medios para llegar a hacerlo, la cual está generando un amplio interés en todo el mundo (Maguire *et al.*, 1991:9, Vol.1).

Los SIG han sido un fenómeno reciente de tal manera que en los últimos 30 años han tenido un crecimiento exponencial en los aspectos tecnológico, de organización y manejo de información, en el contexto de la informática, y parcialmente, en el de desarrollo teórico. Este amplio progreso y desarrollo en aspectos tecnológicos e informáticos no se ha extendido hacia el campo del análisis espacial conceptual, en el del planteamiento de nuevas estructuras lógicas de manejo de información espacial y sobre todo en la posibilidad de establecer la definición de SIG.

0.1.1 Objetivo general.

Los principales objetivos que se han planteado en esta tesis son:

-Presentar los resultados obtenidos, a partir de la aplicación en tres estudios de caso, de métodos para realizar evaluaciones de tipo geomorfológico, y de aspectos relacionados con el uso de recursos naturales y evaluaciones del medio ambiente (delimitación de unidades ambientales), basando la organización, integración, manejo y análisis de la información en el contexto de un sistema de información geográfica.

-Considerar de manera general las definiciones de SIG, los elementos componentes, los conceptos básicos, los principales niveles de complejidad de análisis y clasificar por campos o disciplinas las aplicaciones que se han realizado de manera general, abarcando particularmente los aspectos relacionados con el medio ambiente, la evaluación de recursos naturales y los estudios geomorfológicos.

-Identificar la importancia de la utilización de los SIG en los estudios geográficos, particularmente en relación con los aspectos de la ciencia geomorfológica y evaluaciones de recursos naturales y del medio ambiente.

Para ello esta tesis se ha dividido en dos partes principales en las cuales se han considerado los siguientes aspectos fundamentales.

La primera parte de este trabajo corresponde a la definición y planteamiento de conceptos y aspectos generales relacionados con un SIG. También en esta parte se han integrado algunos esquemas que caracterizan la utilidad de los SIG en relación al proceso de planificación ambiental y del aprovechamiento de los recursos naturales. Asimismo en esta parte se presenta y explica un esquema simplificado de la función y el sitio que puede ocupar un SIG, dentro de una estructura de organización, para realizar actividades de planificación ambiental. También se hace referencia a los más importantes campos de aplicación en que se han utilizado los SIG, tanto en disciplinas generales como en lo referente a los aspectos específicos tratados en esta tesis. En la parte final de esta sección se presentan algunas características generales del sistema usado en los estudios de caso, ejemplificados en la tesis. En este caso es el sistema conocido por el acrónimo *ILWIS* (*Integrated Land and Water Information System*, ILWIS, 1992 y 1993). Finalmente se presenta una introducción a los tres estudios de caso presentados en esta tesis.

En la segunda parte, la más importante de este trabajo, se presentan los resultados de la aplicación de un SIG en tres estudios de caso. Estas aplicaciones han sido realizadas en México. Específicamente se han llevado a cabo en el Instituto de Geografía de la UNAM, utilizando el Sistema de Información Geográfica ILWIS y en las cuales el autor de este trabajo ha participado directamente.

Es importante aclarar, que los ejemplos de aplicación presentados aquí no son desarrollos exclusivos del autor, sino que forman parte de trabajos conjuntos que han sido realizados en colaboración con investigadores de la institución mencionada. En el texto de las secciones correspondientes, se han marcado los proyectos específicos y las citas bibliográficas apropiadas para referirse más ampliamente a los trabajos antecedentes.

0.1.2 Definiciones de Sistema de Información Geográfica.

Entre las dificultades más evidentes acerca de la definición de los SIG, Maguire (1991:11-20) menciona que la orientación comercial que se le ha dado a las actividades relacionadas con ellos, ha provocado que exista información exagerada o falsa, sobrevaloración y ocultamiento intencional de las dificultades y alcances reales que se pueden obtener cuando se trabaja con esa tecnología. Las dificultades para definir a los SIG se hacen mayores debido al vertido de información contradictoria que manejan los consultores, así como a la existencia de amplias y variadas interpretaciones de conceptos de uso común, debido a la heterogeneidad de campos de aplicación y de usuarios.

Otro aspecto que ha originado dificultades en la definición de los SIG, es que existen diferentes formas de describir y clasificar tanto a los objetos como a las funciones que se realizan con ellos. Esto es debido, sobre todo, a la diversidad de campos y métodos de aplicación. Muchas definiciones de los SIG se han basado en relación a su funcionalidad, otras a partir de su disciplina-origen, capacidad de manejo de información, área de aplicación, equipo utilizado, tipos de datos, costo, etc. (*op.cit.*:10).

En la Tabla 0.1 se han incluido algunas de las definiciones más empleadas acerca de los SIG. Es importante considerar que dentro de estas definiciones existen algunas, en las cuales se ha dado

más relevancia a los aspectos funcionales, otras a los elementos componentes del sistema y otras más a la clase o clases de información empleada, o bien a la clase de problemas que trata de solucionar con dicha tecnología. Los SIG han sido considerados desde su origen, como un caso especial y particular dentro de los sistemas de información general.

Tabla 0.1 Definiciones seleccionadas del significado de los SIG según Maguire (1991:9-20).

Dept.del M.Amb.Gran Bretaña (1987:132): Un sistema para capturar, guardar, corroborar, manejar, analizar y desplegar datos, los cuales están espacialmente referenciados.

Aronoff (1989:39): Cualquier conjunto de procedimientos manuales o basados en computadora, usados para guardar y manejar datos geográficamente referenciados.

Carter (1989:3): Una entidad institucional que refleja una estructura organizada que integra la tecnología con una base de datos, expertos y soporte financiero continuo a través del tiempo.

Parker (1988:1547): Una tecnología de información la cual permite guardar, analizar y desplegar ambos tipos de datos espaciales y no espaciales.

Dueker (1979:106): Un caso especial de sistemas de información donde la base de datos consiste de observaciones sobre características distribuidas espacialmente, actividades o eventos, los cuales son definibles en el espacio como puntos, líneas o áreas. Un SIG maneja datos acerca de esos puntos, líneas y áreas, para llamarlos en las consultas y análisis *ad hoc*.

Smith et al.(1987:13): Un sistema de bases de datos en el cual la mayoría de ellos están *indexados* espacialmente y sobre los cuales un conjunto de procedimientos son aplicados con el fin de responder a las consultas acerca de las entidades espaciales en dicha base.

Ozenoy, Smith y Sicherman (1981:92): Un conjunto de funciones que provee a los profesionales con capacidades avanzadas para el guardado, llamado, manejo y despliegue de datos localizados geográficamente.

Burrough (1986:6): Un conjunto de herramientas potentes para coleccionar, guardar, llamar (recuperar) y en su caso transformar y desplegar datos espaciales del mundo real.

Cowen (1988:1554): Un sistema de soporte para la toma de decisiones que involucra la integración de datos referenciados espacialmente en la solución de problemas del medio ambiente.

Koshkariov, Tikunov and Trofimov (1989:259): Un sistema con capacidades avanzadas para hacer geomodelamiento.

Devine y Field (1986:18): Una forma de sistema para el manejo de información (SMI) que permite el despliegue de mapas de información general.

Considerando las anteriores definiciones de la tabla, se puede decir que el aspecto primordial tomado en cuenta para establecerlas es, sin duda alguna, por un lado el aspecto que se relaciona a

las funciones que realiza (capturar, desplegar, guardar, seleccionar, etc.) y por otro el de la clase de información que se utiliza (espacial o geográfica y no-espacial o de atributos).

Sólo una de estas definiciones, tal vez la más completa y la de mayor alcance es la de Carter (1989:3), la cual se refiere al aspecto primordial de la estructura de organización en la cual se emplea esa tecnología, la gente que trabaja con los SIG (expertos) y el soporte financiero, que es fundamental para mantener el aparato tecnológico necesario, para utilizar los SIG dentro de una institución, aunque también hay que decir que no hace énfasis en el asunto funcional ni de la clase de información empleada.

De las definiciones mencionadas las tres más utilizadas son la de Burrough (1986:6), de Aronoff (1989:39) y también de Smith *et al.* (1987:13). La definición que más se apega al enfoque de este trabajo es de Cowen (1988:1554) en la cual se habla de la aplicación de esa tecnología para la toma de decisiones (planificación) y la solución de los problemas relacionados con el medio ambiente.

0.2 ANTECEDENTES Y CONCEPTOS GENERALES SOBRE LOS SIG.

En un sentido muy general, un SIG puede ser visto como una serie de elementos que manejan una base de datos, los cuales son principalmente de naturaleza espacial o que pueden ser *indexados* u organizados a partir de un listado de referencia para ser manejados espacialmente (Albert, 1988:1021). Esa serie de elementos permite establecer un conjunto de procedimientos que operan sobre los datos, para estructurar la entrada y salida de *preguntas o consultas/respuestas* acerca de entidades espaciales representadas.

Desde otro punto de vista, un SIG puede ser considerado como un sistema computarizado, diseñado para la entrada, almacenamiento, representación, manipulación y análisis de grandes volúmenes de datos referenciados espacialmente (Albert, 1988:1022). Considerando de nuevo lo que dice Burrough (1989:6-7) acerca de lo que representan los SIG, como un conjunto de herramientas que tienen como fin el coleccionar, almacenar, llamar, transformar, generar y desplegar datos espaciales del mundo real, para propósitos particulares. De acuerdo a esto y según el autor, tales datos describen entidades espaciales en términos de:

- a). Su *posición* con respecto a un sistema de coordenadas conocido,
- b). Sus *atributos* que no están relacionados con la posición (color, frecuencia, costo, etc.) y...
- c). Sus *interrelaciones espaciales con otros objetos (propiedades topológicas)* las cuales describen sus posiciones relativas, conexiones y trayectos.

Una definición más amplia establecida por Aronoff (1989:1), es que los SIG son sistemas computacionales, diseñados para la captura, almacenamiento y análisis de objetos y fenómenos en donde la localización geográfica es una característica importante o *crítica*, dentro de dicho análisis. La utilidad de un SIG es más clara conforme las bases de datos se hacen más extensas, es decir, cuando se manejan y analizan muchos datos que están referenciados geográficamente y donde inciden gran cantidad de factores, el manejo eficiente de esa información no es posible de forma "manual", debido a que sería demasiado costoso y ocuparía gran cantidad de tiempo (*op cit.* 12).

Dentro de la gran cantidad de aplicaciones que se han hecho con los SIG, Aronoff (1989:2) menciona como los más relevantes los siguientes aspectos:

-La búsqueda de la *coincidencia de factores* que intervienen en la presencia de un fenómeno

(modelamiento, definición del patrón del fenómeno y creación de "escenarios"), tales como: la definición de áreas con la presencia combinada de cierta clase de suelo, con cierto tipo de pendiente y una cantidad de lluvia determinada; o bien, la delimitación de las áreas que tienen el mismo intervalo altitudinal, tipo de vegetación y litología, etc.

-La *actualización* de la información geográfica ya producida, sea temática y/o básica. Esto se ha aplicado en los casos en que existen cambios rápidos en los rasgos representados, por ejemplo: crecimiento de áreas urbanas, cambios en los usos del suelo, construcción de obras de infraestructura, etc.

-Actividades de *monitoreo* o seguimiento, mantenimiento y planeación de los servicios en las ciudades, o bien para la definición de áreas en las cuales se tienen que realizar medidas de control, para contrarrestar o disminuir los efectos negativos del uso de los recursos, etc.

0.2.1 Requerimientos que debe cumplir un SIG.

Según Smith *et.al.* (1986) existen algunos requerimientos generales de carácter técnico en relación a la estructura y manejo de la información, que deben ser satisfechos, para que un sistema pueda ser considerado como de *Información Geográfica*:

1. Tener la capacidad para manejar grandes bases de datos, *heterogéneos y multitemáticos*, que tengan representación espacial.
2. Tener la capacidad de *indagar* en tales bases de datos acerca de la existencia, localización y propiedades de un amplio rango de objetos con representación espacial.
3. Tener *eficiencia* en el manejo de datos para tales *indagaciones*, de tal manera que permita ser interactivo con el usuario.
4. Tener una *configuración suficientemente flexible*, como para permitir modificaciones con facilidad o bien para aceptar una amplia variedad de aplicaciones y de usuarios de diferentes disciplinas. Asimismo ser accesible en el intercambio de información con otros SIG, o bien con bases de datos que hayan sido elaboradas en otros sistemas.

A estos cuatro puntos es posible añadir uno más, el cual es cada vez más importante y fundamental en la actualidad: el que un SIG necesita tener un *mínimo de técnicas estadísticas* para procesar y valorar los datos, tanto de naturaleza espacial como no espacial, representados en los diferentes formatos aceptados por tales sistemas (celdas o *raster*, vectorial y tabular).

0.2.2 Elementos básicos que conforman un SIG.

Tres aspectos básicos o elementos conformadores, se tienen que considerar en el momento de estudiar y/o aplicar la tecnología de los SIG. Los dos primeros se refieren a aspectos exclusivamente tecnológico-computacionales y el tercero corresponde con los elementos humanos que hacen uso y adaptaciones de esta tecnología (usuarios, instituciones, especialistas en computación, etc.).

1. Elementos o dispositivos materiales de manejo de la información ("hardware").

Se refiere a los elementos materiales o físicos que hacen posible la integración, uso, transferencia, despliegue, etc., de la información que se emplea en el análisis espacial con SIG. Los

componentes esenciales del "*hardware*" usados son principalmente:

-La unidad central de procesamiento (CPU de sus siglas en inglés), permite el control y manejo de la información. Se encuentran integradas a ella, las unidades de control de entrada-salida de información digital o manejo de discos (duro, flexibles u ópticos), usadas para guardar datos y programas.

-Dispositivos de interacción del usuario con la computadora (terminal, teclado y monitor(es)), los cuales permiten el control de la computadora y de los periféricos.

-Digitizador u otro dispositivo de entrada de datos gráficos (lector óptico o "*scanner*"), que permite la conversión de datos de mapas y/o imágenes a formato digital, para ser enviados al CPU de la computadora.

-Un graficador o "*plotter*", o cualquier otro tipo de dispositivo de despliegue gráfico de salida (impresora, cinta de video, transferidor a película fotográfica o "*film-writer*", etc.) que permita presentar los resultados del procesamiento de la información en el SIG, para su posterior interpretación por el usuario.

-Un manejador de cintas y cassetes de 8 mm (exabyte), cuya función es la de guardar grandes volúmenes de datos y/o programas en cinta magnética para la conservación de la información (cintoteca) o para su transferencia a otros sistemas.

2. Conjunto de programas ("*software*").

Los programas individuales, los cuales comunmente conforman una estructura más compleja llamada *Sistema de Información*, realizan, cuando el usuario así lo requiere, una serie de rutinas a partir de las cuales se presentan al final de dicha secuencia de funciones empleadas, una serie de resultados de los procesos de manejo de información y cálculos.

Estos programas tienen una estructura tal, que esos resultados se integran y utilizan directamente en otros programas del mismo sistema sin que el usuario lo note, de tal manera que al final de una secuencia de peticiones que le hace un usuario al sistema se ha pasado, regresado y llamado algunos resultados parciales de diferentes programas, los cuales integran estructuras cada vez más complejas dentro de dicho sistema.

Finalmente, cada uno de estos programas individuales lo que permite realizar es una secuencia de órdenes estructuradas lógicamente que facilitan la solución parcial o general de consultas o preguntas ("*queries*" en inglés) aplicadas a dicho sistema de información. Existen cinco aspectos que se relacionan con las funciones técnicas que realizan los programas que componen un SIG, estas son:

-Funciones o rutinas para la entrada, transformación y verificación de los datos. Este módulo se refiere a todos los puntos relacionados con la captura y transformación, en formato digital, de los datos básicos obtenidos desde diferentes fuentes: mapas, imágenes de satélite, videoimágenes, fotografías aéreas, observaciones de campo, resultados de análisis de laboratorio, etc.

-Funciones de almacenamiento y manejo de la base de datos. Esta parte se refiere a la manera en cómo el sistema estructura y organiza la información de los elementos considerados en el análisis, es decir, se toman en cuenta sus características de posición, conectividad y atributos (propiedades topológicas).

-Funciones para el procesamiento y análisis de la información. En esta parte se concentran las

funciones principales que puede desempeñar un SIG en relación a la "contestación" de preguntas requeridas por el usuario, con respecto a un análisis en particular. Aquí es donde se marca más claramente la diferencia entre un SIG y un sistema cartográfico asistido por computadora (CAD/CAM, ver Burrough, 1989:81).

Esta parte se puede complementar diciendo que un SIG proporciona una serie de funciones de análisis de los aspectos espaciales y topológicos de la información geográfica, sus atributos no-espaciales y la combinación de ambos.

Cambios de escalas y de proyecciones cartográficas, rotaciones y translaciones de la información espacial, despliegues tridimensionales, cálculos de áreas, operaciones con lógica Booleana, clasificaciones, "sobreposiciones" de mapas, análisis matemático y estadístico de mapas e imágenes, interpolaciones, etc., son sólo algunos de los procesamientos que se pueden realizar en el módulo de análisis.

-Funciones de salida y representación de los resultados. Esta parte se relaciona con las diversas maneras (mapas, tablas, gráficas e imágenes) en que pueden ser representados y obtenidos los resultados del análisis. Desde despliegues en pantalla, impresiones en papel y película, hasta archivos en formato digital, son las formas comunes de presentación.

Un SIG debe tener la posibilidad de realizar estas funciones adecuadamente y con un tiempo de respuesta aceptable, además de recibir actualización constante en los programas para así aceptar la mayor cantidad de los modelos, marcas, y tipos de periféricos utilizables para dar salida a tales resultados.

-Funciones o rutinas de interacción con el usuario. Las maneras en cómo el usuario puede comunicarse con el sistema es un punto esencial para la aceptación y uso de un SIG (*op cit.*:10). El desarrollo de sistemas "amigables" es cada vez más frecuente, esto ha permitido que los usuarios interactúen continuamente con los SIG, sin que se requiera la presencia de un especialista en computación como *intermediario*.

En general, los SIG instalados en computadoras personales, que funcionan a base de "menús" y/o "ventanas" permiten su aprendizaje y entrenamiento de una manera más sencilla y rápida, lo que redundará en la difusión y aprovechamiento de esa tecnología.

3. Aspectos de organización de la institución y objetivos de los usuarios.

Es importante mencionar ahora que, los aspectos técnicos considerados en los puntos 1 y 2 de los párrafos anteriores, lo único que aseguran es el procesamiento efectivo de la información, pero no permiten por sí mismos confirmar que el análisis y la interpretación de los resultados ha sido el adecuado.

Lo fundamental es tomar en cuenta el contexto de la entidad institucional u organización donde se usa un SIG. Esto tiene relación con los objetivos de las instituciones, requerimientos y necesidades de planeación y manejo, entrenamiento del personal, características del equipo y sistema utilizado, etc.

De esto se puede concluir que no es suficiente comprar una computadora e instalar un conjunto de programas de análisis de información geográfica y esperar resultados exitosos e inmediatos, sino que se necesita, sobre todo, preguntarse si se requiere de la instalación de esa nueva tecnología. Si la respuesta es afirmativa, entonces deberán hacerse modificaciones de la estructura general de los procesos de trabajo y aprobar las inversiones necesarias para dar entrenamiento al personal técnico y al conjunto de directivos (Burrough, 1989:10).

En la Figura 0.1 se ha esquematizado y simplificado la función y el sitio que ocupa un SIG dentro de la estructura de organización, para las actividades de planificación del aprovechamiento de los recursos naturales y evaluaciones de cambios en el medio ambiente.

El SIG en este caso cumple la función de ser la base para el manejo e integración de la información, necesaria para dar elementos de juicio a los planificadores, para que a su vez ellos, de acuerdo a su modelo de planificación, establezcan prioridades y metas. Además de plantear las preguntas o "*consultas*" ("*queries*"), las cuales serán "*contestadas*" en relación a la información de partida, por el propio sistema de información geográfica.

Como se puede ver, esta estructura de flujo y análisis de la información es *realimentadora*. Un aspecto básico que hay que considerar en esa estructura, es la posibilidad de generar internamente nueva información, a partir de los análisis realizados, y por otro lado la oportunidad de ampliarla "*desde afuera*", tanto en cantidad como en calidad (inventarios a más detalle, tanto en cubrimiento de espacio como de tiempo, o bien datos obtenidos a partir de otros métodos).

Algunos de los resultados *tangibles* en este proceso se consideran dentro de la fase de *información de salida* (cuadro de la figura) como productos externos. Esto implica toda la información tabular y gráfica (mapas), relativa a los resultados de las propuestas evaluadas en tales procesos de planificación.

0.2.3 Principales niveles de complejidad de análisis realizados con un SIG.

Se han mencionado antes aspectos de las "*consultas*" que realiza el usuario o de las preguntas que plantea y con las cuales, a partir de los resultados que obtiene, a partir del procesamiento de la información en el SIG, le permiten contestarlas, interpretarlas y definir conclusiones adecuadas. Para ello se emplean ciertas *capacidades* o funciones del SIG en la realización de tales análisis. Se habla entonces de los diversos niveles de complejidad de análisis que pueden ser realizados en el ambiente de esa tecnología (SIG).

En la Tabla 0.2 se presentan los principales niveles de complejidad para el manejo y análisis de la información al aplicar un SIG. Nótese que los niveles de análisis se hacen cada vez más complejos conforme se avanza en la descripción. A estos niveles de complejidad se hará referencia en la parte de la tesis correspondiente a los procesos de análisis empleados en las aplicaciones particulares o estudios de caso.

En relación a lo presentado en la tabla mencionada se puede hacer una descripción de cada uno de esos niveles de complejidad. Por ejemplo el primero se refiere al principio fundamental de la Geografía, la *Localización*, es el nivel más simple de análisis y con él se responde una pregunta específica *¿Qué está en...?*, es decir qué clases de objeto u objetos están en el sitio o sitios que se están analizando o que se quieren analizar. Dicho de otra manera, con este nivel se determinan los tipos de propiedades o características que ocurren en un sitio definido por el usuario, ejemplo: *¿Cuáles son los tipos de vegetación registrados para el municipio X?*

El segundo nivel lo que permite contestar es justamente el sentido opuesto del tipo de análisis mencionado en el nivel uno, esto es, a partir del conocimiento de las características que describen a los objetos o sitios, se puede entonces preguntar *¿Dónde está o están los sitios u objetos con tales características?* es decir, se establecen las condiciones de localización de los sitios que se caracterizan por una propiedad definida, ejemplo: *¿Cuáles son los sitios o unidades de mapeo dentro del municipio X cuyo tipo de vegetación es el Matorral Crasiccaule?*

Al nivel *tres* le corresponde una complejidad mayor y se refiere, sobre todo, a la información analizada con un seguimiento a través del tiempo, es decir se considera el *¿Cómo han cambiado*

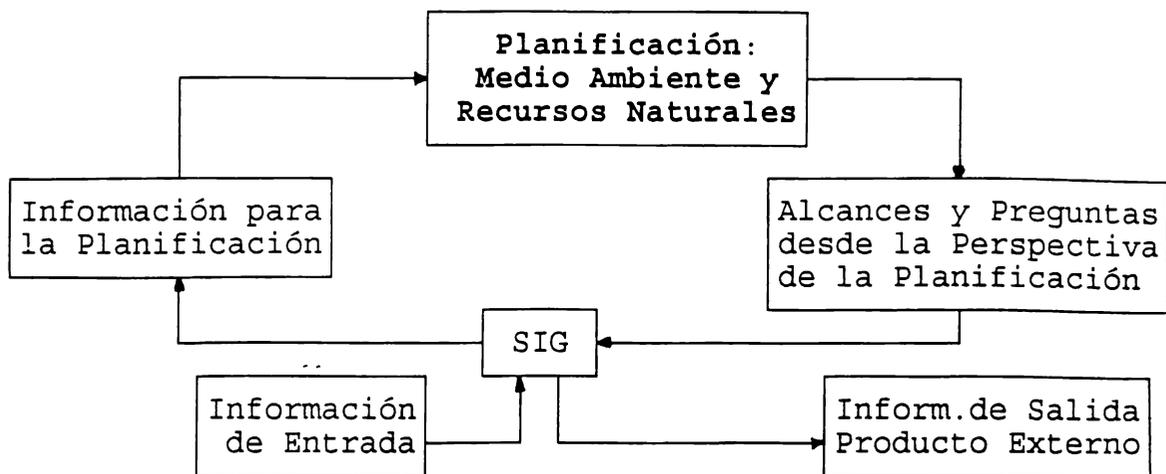


Figura 0.1 Sitio que ocupa un SIG dentro de una estructura de organización para la planificación del medio ambiente y del aprovechamiento de los recursos naturales (modificado de Burrough, 1991:10).

Tabla 0.2 Principales niveles de complejidad de análisis y tipos de *consultas* que pueden ser realizados utilizando un SIG

1. Localización	¿Qué está en...?
2. Condición	¿Dónde está?
3. Tendencias	¿Cómo ha cambiado?
4. Rutas	¿Cuál es el mejor camino y/o sitio?
5. Patrón	¿Cuál es el patrón del fenómeno?
6. Modelamiento	¿Qué va a pasar si...? (aplicación de modelos, creación de escenarios, mapas de coincidencias)

MODIFICADO DE RHIND (1990) Y PRESENTADO EN MAGUIRE *et al.* (1991:16 Vol.1).

los sitios u objetos en el lapso o lapsos definidos? Para ello es necesario tener una resolución de la información al nivel máximo de detalle en relación al aspecto de temporalidad, esto es, tener cuando menos registros de información en dos momentos diferentes (fechas), para así establecer una tendencia mínima de la dinámica del fenómeno estudiado.

Esto mismo no sólo se plantea en términos de temporalidad sino que puede ser considerado también, y con énfasis significativo, en los *Cambios en el Espacio o Espacialidad*. Ejemplos de preguntas sobre esos dos aspectos (espacio y tiempo) pueden ser: *¿Cuáles son las heterogeneidades de cambio en el espacio en relación a los tipos de vegetación dentro del municipio X?* o bien *¿Cómo han sido modificadas las distribuciones espaciales de tipos de vegetación en las últimas dos décadas dentro del municipio X?*

A los tres niveles restantes de análisis les corresponde una complejidad considerablemente diferente y de más alto nivel que en los casos anteriores, ya que involucran, generalmente, algunas de las funciones relacionadas con análisis espacial (Maguire *et al.* 1991:16, Vol.1).

Al nivel *cuatro* le corresponden la aplicación de una serie de funciones que están relacionadas sobre todo con el *Análisis de Redes* dentro de un SIG. En este caso el nivel de complejidad de análisis se refiere a la solución de la pregunta *¿Cuál es el mejor camino a seguir dentro de una red definida (ríos, gasoductos, calles, canales de riego, carreteras, etc.)?* Entendiendo como *mejor camino* el que cumpla más ampliamente las necesidades del usuario en función de los requerimientos establecidos para las variables condicionantes, esto es, por ejemplo: buscar entre dos o más sitios elegidos (o puntos dentro de la red) el camino más corto, más rápido, más barato, etc.

Para ello habrá que considerar el concepto de *red*, como una serie de elementos integrados, cuya característica espacial principal es que pueden ser establecidos individualmente como estructuras de representación en forma de línea (segmentos o arcos), más que como superficies (polígonos) o puntos, en los cuales existen una serie de atributos de *flujo*, los cuales caracterizan a cada una de tales entidades y con las cuales se pueden establecer una serie de relaciones complejas.

Siguiendo el esquema de ejemplificación que se ha empleado en los anteriores niveles, se puede plantear la búsqueda de respuestas a la pregunta: *¿Cuál es el sitio más adecuado, para construir un hospital, al cual se pueda llegar con automóvil, desde cualquier lugar dentro de la Ciudad X, empleando la menor cantidad de tiempo, considerando particularmente las características específicas de los flujos viales y sus cambios durante las horas del día?*

El nivel *cinco* permite describir (en términos de funciones de análisis espacial) y comparar el patrón de la *distribución* de los fenómenos, y a partir de esto entender y concluir cuáles son los procesos que producen esa distribución. Un ejemplo de consulta o pregunta en este nivel podría ser: *¿Existe una tendencia definida o patrón de distribución en las áreas erosionadas detectadas en el municipio X?*

Dentro de este nivel, es posible definir si las variables que se habían considerado originalmente como importantes (hipotéticamente al inicio de la investigación) realmente lo son y a partir de ello se puedan ir deslindando, por coincidencia de presencia-ausencia espacial, con las áreas que sí presentan el fenómeno que se estudia.

El tipo de consultas relacionadas con la definición de *patrones* permite a los científicos sociales y del medio ambiente, así como a los planificadores, describir y comparar la distribución de los fenómenos y entender los procesos que están involucrados en tal distribución (Maguire *et al.* 1991:16, Vol.1).

En el nivel *seis*, en el cual se presenta la mayor posibilidad de complejidad en análisis, no

solamente se considera un tipo de pregunta o bien sólo una clase de consulta individualmente, aquí se trata de englobar o conjugar una serie de funciones del SIG que permitan diferentes tipos de análisis, para llegar a resolver el objetivo de realizar *modelamiento*, es decir la aplicación de un modelo definido previamente.

Dicho modelamiento se puede describir como la aplicación de una representación del fenómeno estudiado, en términos de definir cuáles son las variables *importantes* o determinantes del proceso considerado, y además definir cuáles son sus tendencias de cambio. De tal manera que en base a un lenguaje formal o matemático se establezcan las relaciones entre tales variables, y se obtenga una respuesta del comportamiento del fenómeno a partir de una *simulación controlada*, es decir, condicionada por el sentido y magnitudes reales, de las tendencias de cambio de las variables.

Esta representación o modelo está definida por una o por un conjunto de teorías que explican las relaciones entre dichas variables. Tales teorías se han determinado, generalmente en base a un método empírico, a partir de una serie de mediciones continuas realizadas en el *mundo real*. Otra manera de plantear esa representación sería a partir de la obtención de una serie de teorías en base a un método deductivo formal.

A partir de la aplicación de tales modelos se obtienen las respuestas a un fenómeno determinado, al definir en función de las tendencias de las *variables definitorias*, las respuestas a las preguntas del *¿Que va a pasar si....?*. Otra manera de ver este mismo aspecto es, el de tratar de dar respuestas al fenómeno estudiado en base a la posibilidad de crear *escenarios geográficos*. Este procedimiento consiste en generar mapas o *imágenes instantáneas* de las condiciones futuras, que se presentarán en función de la aplicación de un modelo, o bien a partir de la determinación de las *tasas de cambio* (tendencias de variación en el tiempo) de una o algunas de las variables que intervienen en tal fenómeno.

Esto tiene como objetivo principal el realizar pronósticos geográficos, los cuales resultan ser la información fundamental útil para la planificación del aprovechamiento de los recursos. Otro enfoque de la aplicación de modelos se refiere a la posibilidad de elegir valores específicos de búsqueda dentro de las variables importantes, es decir los resultados de consultar al SIG acerca de los sitios donde existen *coincidencias* entre los valores de las variables importantes, que definen tal fenómeno, lo cual permite el tener como resultado un *mapa de coincidencias*.

Tomando el mismo esquema de ejemplificación de los anteriores niveles, se puede plantear la búsqueda de respuestas a la pregunta: *Para el año 2050 ¿cuáles serían las áreas de mayor aporte de sedimentos y cuánto aportarían de acuerdo a lo establecido por el modelo USLE (Ecuación Universal de Pérdida de Suelos) si las condiciones de deforestación actuales de la porción alta de la cuenca hidrográfica X siguen creciendo al ritmo actual?*

0.3 LOS SIG COMO HERRAMIENTAS PARA LA PLANIFICACIÓN DEL MEDIO AMBIENTE Y EL APROVECHAMIENTO DE LOS RECURSOS NATURALES.

Como se dijo al principio de este capítulo, la demanda para la captura, almacenamiento, análisis y despliegue de amplios volúmenes de datos de diferentes orígenes, temporalidades, escalas, formatos, etc., han propiciado la generación y el establecimiento de nuevos métodos y tecnologías de análisis. Los SIG están cambiando los procedimientos de obtención de datos espaciales y los procesos analíticos que los utilizan (Valenzuela y Weir, 1989:1).

Es evidente que los asuntos relacionados con el medio ambiente y la planificación de los recursos naturales, han llegado a ser aspectos primordiales para las sociedades humanas, sobre todo en la evaluación de las perturbaciones potenciales y reales que podemos causar y que hemos causado. Todo esto en relación al funcionamiento de los ecosistemas y a los efectos directos e indirectos de

uso, con respecto a las comunidades bióticas, así como con los elementos del medio físico.

La información que se utiliza en asuntos ambientales es compleja y voluminosa, e involucra la mayor parte de las disciplinas científicas, desde los especialistas relacionados con los aspectos físicos del medio ambiente y de los recursos naturales (climatólogos, geógrafos, edafólogos, geomorfólogos, etc.), los relacionados con los aspectos bióticos (botánicos, zoólogos, ecólogos, etc.), los relacionados con aspectos sociales y económicos (sociólogos y economistas), los relacionados con aspectos legales (especialistas en legislación ambiental), así como los que se dedican específicamente al ordenamiento territorial, ingeniería ambiental, gestión de proyectos, actividades políticas, grupos de ecologistas, etc.

Debido a esta diversidad de disciplinas, métodos de análisis y clases de información; la integración, análisis, captura, organización de los datos, con los fines mencionados, es la más compleja y es en ese campo, tal vez en donde, la aplicación de los SIG es la más clara, en cuanto a las posibilidades de uso de las funciones de integración de información y de análisis espacial. De acuerdo a lo anterior es evidente que la característica principal de la información que se utiliza en este campo, es su heterogeneidad, sobre todo en relación a escalas espaciales y a métodos de obtención.

Por lo tanto, el uso efectivo de grandes volúmenes de información espacial depende de la existencia de sistemas eficientes que puedan transformar estos datos en información utilizable. Un conocimiento amplio, exacto y preciso de localización, cantidad y disponibilidad de los recursos naturales es fundamental e indispensable para una planificación racional.

En la Figura 0.2 se ha esquematizado, de una manera muy simple, una forma de plantear el proceso de planificación del medio ambiente y del aprovechamiento de los recursos naturales dentro del contexto metodológico que involucra el uso de un SIG. Las características principales de este planteamiento en ese contexto son: *flexibilidad, realimentación e interactividad*.

El primer aspecto a considerar dentro del proceso, es tratar de concretar una percepción del *mundo real*, la cual permita plantear las características de la información fundamental a coleccionar (la existente y la faltante), a partir de la realización de los inventarios sobre los recursos naturales. El paso posterior es plantear una estrategia de obtención práctica de esos datos. Esto evidentemente involucra un problema importante que se presenta normalmente en estos casos: la carencia de información con suficiente detalle espacial y temporal, que permita tener mayor certeza o menor incertidumbre en los resultados del análisis a realizar.

Después de la fase de obtención de la información, la cual puede acarrear (en función de los objetivos planteados y del nivel de detalle del análisis a realizar) de un esfuerzo enorme en cuestión de tiempo, recursos económicos, personal involucrado, etc., se tiene que realizar entonces una depuración de tal información (selección de los datos básicos), de tal manera que en la fase de introducción de los datos al SIG, sólo se consideren los realmente necesarios de estar en formato digital.

En esta fase de introducción de los datos se emplea una serie de elementos que por su carácter tecnológico (*hardware*), permiten conseguir una manera óptima de realizar tal función. Como se dijo antes la información empleada en este campo de aplicación, el cual cubre e involucra a una gran cantidad de disciplinas, es de grandes volúmenes y tipos, lo que ocasiona que se necesiten plantear esquemas apropiados para realizar tales funciones. Funciones tales, como desde el definir si se utiliza un medio manual o automático de introducción de información gráfica (con tableta digitizadora o con barreador óptico *scanner*), o bien si se emplea cierto formato de archivos con estructura *raster*, o bien si la base de datos tabular ya existente puede ser transferida al SIG sin complicaciones.

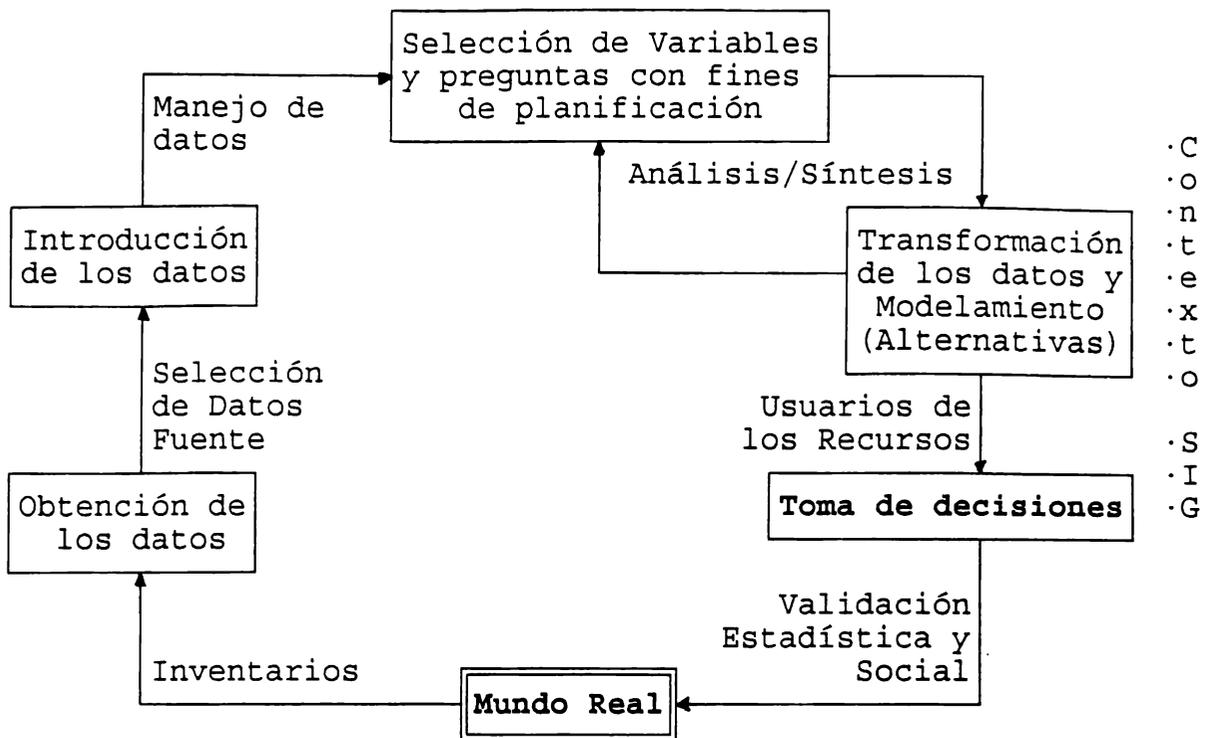


Figura 0.2 Los SIG como herramientas para la planificación del medio ambiente y el aprovechamiento de los recursos naturales (modificado de Valenzuela and Weir, 1989:2).

Tabla 0.3 Las tres grandes categorías de campos de aplicación de los SIG.

<p>1. Aplicaciones en planeación y ordenamiento territorial:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Propuestas de aprovechamiento de los Recursos Naturales -Desarrollo Urbano -Políticas públicas, toma de decisiones, planeación integrada
<p>2. Aplicaciones en estudios ambientales:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Bases de datos nacionales, continentales y mundiales de variables ambientales (PNUMA, CORINE, etc.) -Bases de datos específicas: suelos, erosión, degradación, vegetación, cuencas, etc. -Integración y análisis de variables en estudios específicos
<p>3. Aplicaciones en estudios económicos y sociales:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Tenencia de la tierra, catastro rural y urbano -Censos económicos y de población, actividades electorales -Dotación y prestación de servicios urbanos -Análisis de mercados

BASADA EN LA ESTRUCTURA TEMATICA DE MAGUIRE *et al.*, 1991, Vol.2

La dimensión de los elementos físicos y humanos a emplear para la introducción de los datos dentro del sistema, como se dijo antes, está en función del volumen de la información definida como necesaria, los tipos de formatos en que se encuentra la cual y las posibilidades en cuanto a disposición de recursos económicos existentes, etc.

En relación a la fase anterior, pero considerando que la información ya se encuentra dentro del SIG, las características del proceso descrito en el esquema dependen mucho de la estructura de manejo y organización de la información del SIG empleado. Por lo tanto aquí se está en dependencia total de la estructura del diseño original, para el manejo y organización de las bases de datos, así como las formas posibles de actualización y ampliación de esa información.

La fase más importante dentro del esquema planteado en la Figura 0.2, es la que se refiere a la selección del modelo a aplicar y las variables a utilizar. Dentro de esta fase están fundamentalmente el planteamiento y selección de las preguntas o *consultas* que se harán al SIG. El enfoque empleado en este proceso de planificación puede ser de diversas clases, desde el comúnmente utilizado que privilegia los aspectos económicos, o bien el que considera primordiales los requerimientos planteados por los grupos sociales directamente relacionados, hasta el que emplea un enfoque científico-ecológico-ambiental.

Para llegar a la fase siguiente es necesario realizar una serie de procesos análisis/síntesis con el SIG, los cuales permitirán contestar las consultas hechas previamente por los planificadores. En este punto es necesario remarcar que a medida que se tengan mayores posibilidades de análisis espacial con el SIG empleado, así es como se tendrán disponibles o no, herramientas más o menos complejas para llegar a los objetivos establecidos.

El resultado de esta parte del proceso, es el establecimiento de una serie de alternativas de manejo de los recursos, de las cuales una de ellas se elige en función de las necesidades y requerimientos de la población así como de los objetivos de planificación, asociados con los planteamientos propios de los directamente involucrados con el uso de esos recursos. En este sentido se plantea, como parte de un proceso *ideal*, el que los integrantes del conjunto social (usuarios de los recursos), estén involucrados en este proceso de toma de decisiones.

La *validación estadística* se refiere a los aspectos puramente técnicos de los resultados del proceso de análisis/síntesis y de modelamiento, son sobre todo una serie de técnicas estadísticas (comúnmente multivariadas) empleadas para agrupar o agregar entidades espaciales en este caso en relación a la información de la multitud de variables que normalmente se encuentran involucradas en este proceso, o bien son técnicas que permiten definir cuáles variables influyen más en las condiciones del fenómeno estudiado.

Finalmente lo que valida estadísticamente los resultados obtenidos son las pruebas de certidumbre o *confianza estadística* dadas por las técnicas empleadas y por las características de la información utilizada. Sin embargo este tipo de validación no asegura que las interpretaciones de los resultados y de los análisis realizados, sean las más adecuadas.

En función de la decisión tomada es necesario realizar un seguimiento para definir con qué éxito se llevó a la realidad tal alternativa/estrategia. Esto mismo incluye de manera muy importante una *validación social* de la efectividad de conseguir las metas establecidas originalmente, esto es, se hace una evaluación, dentro de los grupos sociales involucrados, y se considera qué tanto éxito, según sus perspectivas de desarrollo, se ha conseguido, al llevar a cabo en la realidad la estrategia elegida.

Tomando en cuenta las posibilidades de aplicación del esquema mostrado y considerando las explicaciones anteriores, se puede decir que el enfoque actual en la creación de los SIG, consiste en estructurarlos con base en la presencia de *módulos* o conjuntos específicos de *programas*-

herramienta, los cuales pueden ser combinados en diversas formas para satisfacer las necesidades de una amplia variedad de usuarios, ya que esto asegura que exista una amplia flexibilidad para la integración de nuevas herramientas desarrolladas, ya sea por la institución generadora del SIG o incluso por el mismo usuario.

La factibilidad es esto último es alta, sobre todo cuando existe la oportunidad de realizar, conjuntos de tareas secuenciales, programadas en base a los *batch files* o archivos de realización de tareas secuenciales automáticas, sin intervención del usuario; o bien mediante las funciones *macro* o también por los semilenguajes de programación (*SQL* por ejemplo), los cuales permiten editar y aplicar, líneas de programación o *queries*, integrados en muchos de los SIG comerciales.

En relación a una de las clases de información de entrada que se usa comúnmente en análisis con SIG, es importante decir que, los productos de la tecnología de la percepción remota, son una fuente fundamental y básica de datos para un SIG. Esto en relación principalmente con estudios e inventarios de recursos naturales, sobre todo con el fin de tener información fidedigna, actualizada y con suficiente detalle. También esos productos pueden ser usados tanto para los procesos de seguimiento o "*monitoreo*", como para los de actualización. Al respecto se tiene que decir que, las técnicas de procesamiento de imágenes digitales proporcionan, sobre todo si están integradas dentro de un SIG, las herramientas para transformar y extraer información útil, partiendo de información *cruda* que es recibida, originalmente, por los sensores instalados en los diferentes tipos de plataformas (comúnmente en satélites).

0.4 INSTITUCIONES, USUARIOS Y PRINCIPALES CAMPOS EN QUE SE HAN APLICADO LOS SIG.

Los campos y las maneras de realizar aplicaciones con los SIG son casi ilimitados. Los límites más comunes son los que dan la amplitud y profundidad de los conocimientos, la experiencia (o la falta de ella), el ingenio, la imaginación y la creatividad del grupo de usuarios que trata de aplicar esa tecnología.

Para entender mejor cuáles han sido los principales campos de aplicación de los SIG, se tendría que revisar primero cuáles son los usuarios/instituciones que hacen uso ó en donde se hace uso de tales sistemas de información. En México se han orientado las aplicaciones de los SIG por diversos caminos, definidos por intereses y objetivos particulares de las entidades y de los individuos. Existen algunas áreas/instituciones/usuarios reconocidas como centros en los cuales se ha hecho uso de los SIG en los años más recientes:

1. Los institutos de investigación científica pertenecientes a las universidades públicas principalmente, y en pocos casos a las universidades privadas. En este ámbito se han aplicado particularmente en áreas relacionadas con los inventarios de recursos naturales, en evaluaciones ambientales y en la caracterización de algunos tipos de infraestructura
2. En otro ámbito los SIG se han aplicado en las entidades gubernamentales (Secretarías de Estado) que cumplen en algunos casos funciones de servicio. Por ejemplo en la actualidad existe un amplio y complejo conjunto de elementos tecnológicos conjugados en un contexto de estructura de aplicación de sistema de información geográfica y percepción remota, con fines de producción de la cartografía topográfica en formato digital de todo el país, en escala 1:50,000.

Dentro de este mismo contexto de generación y actualización de la cartografía básica, particularmente la temática, actualmente se está realizando un esfuerzo amplio por parte del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), es el caso de la cartografía de uso del suelo y vegetación, en escala 1:250,000, empleando un método de corroboración en campo de imágenes de satélite, en relación a lo establecido en compuestos de color corregidos,

georreferenciados y editados cartográficamente (*espaciomapas*). La corroboración de campo está coordinada por las delegaciones regionales del instituto mencionado y la edición de los mapas finales se están realizando en su sede nacional en la ciudad de Aguascalientes.

Productos digitales resultados de este esquema de servicio comunicación y generación de información geográfica, son por ejemplo las bases de datos tabulares de los censos económicos y de población, información espacial digital en formatos *raster* (modelos digitales de terreno) y *vectorial*, así como las configuraciones en segmentos de las áreas urbanas de algunas ciudades del país. Otro ejemplo de entidades donde se realizan aplicaciones de SIG en el área de los servicios, es en la asignación de tasas de impuesto predial con fines de captación presupuestal, en la oficina de Catastro del Departamento del Distrito Federal.

3. A partir de que surge la necesidad de realizar estudios del medio ambiente (*manifestaciones* de impacto ambiental y estudios de *ordenamiento territorial*) como una propuesta, establecida por la Secretaría de Estado correspondiente (SEDUE ahora SEDESOL), deseable de realizar por todas las entidades públicas y privadas las cuales hacen uso de algún tipo de recursos naturales y de elementos del medio ambiente. Debido a esto se abre un campo amplio de aplicaciones, el cual ha sido aprovechado (en algunos casos con fines exclusivos de lucro) por muchas compañías de consultoría.

Sus aplicaciones en esta área, han sido limitadas en el sentido de la profundidad de análisis espacial, además de que dichos estudios han sido parciales en cuanto a nivel de análisis, generación de nueva información y planteamiento y aplicación de metodologías *ad hoc* a las posibilidades de análisis existentes en los SIG. En muchos casos y para esta rama de aplicación, los SIG sólo han sido usados como herramientas automatizadas de generación de cartografía.

4. Un cuarto ámbito de instituciones, está en los institutos de investigación del sector público (gobierno), descentralizados y de iniciativa privada (principalmente empresas transnacionales), ejemplos de esto son respectivamente los institutos mexicanos del Petróleo, Transporte, Comunicaciones, Colegio de la Frontera Norte, Centro Científico IBM, etc.

En la Tabla 0.3 se han colocado las tres grandes categorías de los principales campos de aplicación de los SIG, clasificándolos de acuerdo a los tres principales aspectos que han desarrollado para su organización, conocimiento y manejo de sus recursos las sociedades humanas: Planeación, Medio Ambiente y Economía/Sociedad. En Maguire *et al.* (1991, Vol.2) se ha hecho una recopilación amplia de las aplicaciones a nivel mundial de los SIG en los campos o disciplinas más importantes, considerándolos por países y también por materia. Los aspectos o temas que se han incluido dentro de cada una de las categorías de aplicaciones son sólo algunos tópicos dentro de los muchos que podrían haberse incluido en cada caso.

Valenzuela y Weir (1989:2) hicieron un agrupamiento de áreas frecuentes de aplicación de los SIG en relación a los resultados materiales que se obtienen (enfoque utilitario):

1. Cartografía automatizada,
2. Trazo de parcelas y calles, cálculo de movimiento de tierras en ingeniería civil,
3. Producción de mapas catastrales,
4. Producción de mapas de autopistas,
5. Cartografía geodésica,
6. Cartografía de eventos (accidentes, incendios, robos, etc.),
7. Cartografía de censos y estadísticas relacionadas,
8. Manejo de datos de registros de pozos,
9. Planeación del uso del suelo,
10. Estudios de impacto ambiental,
11. Mapeo de recursos naturales (inventarios),

12. Tenencia de la tierra,
13. Estudios de mercado,
14. Rutas con vehículos,
15. Planeación urbana y regional,
16. Selección de trazos de carreteras, etc.

0.5 CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA UTILIZADO EN LAS APLICACIONES QUE SE PRESENTAN EN LA TESIS.

A finales de 1985, el *Instituto Internacional para Levantamientos Aeroespaciales y Ciencias de la Tierra (ITC)* de los Países Bajos (Holanda), consiguió un financiamiento del gobierno holandés (*Ministerio para la Cooperación y el Desarrollo*), con fines de ampliación de las actividades de investigación en países subdesarrollados. Estos recursos fueron dispuestos para un proyecto cuyo objetivo más general, fue el de desarrollar un sistema de información geográfica, el cual serviría para aplicarse en la delimitación de unidades de uso del suelo y en la planificación del uso de los recursos de las cuencas hidrográficas. Se pensó en generar una herramienta de amplio y eficiente uso para el campo del *monitoreo* ambiental y de la planificación para el aprovechamiento de los recursos naturales (Meijerink, 1990:205).

El objetivo principal del proyecto de implementación del SIG, fue generar un sistema de programas integrados con estructura de sistema de información, que permitiera su uso no centralizado e instalable en un *hardware* independiente (computadora personal PC), con posibilidad para su amplia difusión, poco complejo y disponible para la generalidad de los países subdesarrollados. Sin embargo, el sistema tendría que ser versátil y *amigable* y tener suficiente capacidad analítica para realizar interacciones complejas entre los aspectos biofísicos, sociales y económicos, necesarios de considerarse en el modelamiento con fines de planificación (*op cit.*:206, ILWIS, 1992:1.1; Valenzuela, 1988:3-14).

Este sistema se conoció originalmente como el software del *Proyecto Sumatra* y posteriormente adquirió el nombre específico de *ILWIS (Integrated Land and Water Information System)* por sus letras iniciales en idioma inglés (ver ILWIS, 1992 y 1993). Este SIG es el que se ha utilizado para las aplicaciones que se presentan en la segunda parte de este trabajo (tres estudios de caso).

El desarrollo de los SIG en el ITC ha sido con el fin de mantener un equilibrio entre la creación y uso de tecnologías para la interpretación y el procesamiento de la geo-información y la utilización de esa información resultante para la planeación en el manejo de los recursos naturales (ILWIS, 1992:1.1).

De acuerdo a los programadores de ILWIS (Gorte *et al.*, 1990:215) este sistema fue desarrollado con la filosofía subyacente de que debería dársele a los usuarios una herramienta que tuviera la mayor flexibilidad posible y que tuviese un amplio campo y variedades de aplicaciones en diferentes disciplinas y además que permitiera también que de acuerdo a cada disciplina fuese posible trasladar y adaptar la estructura de modelo de datos a dicha disciplina de aplicación. En relación al modelo de datos y de acuerdo a lo anterior, ILWIS permite el uso de información con ambas estructuras, *raster* y vectorial, así como datos de atributos con estructura tabular.

Este sistema está estructurado a base de módulos, a partir de la existencia de un conjunto de programas *ejecutables* (construidos en lenguaje de programación), con los cuales es posible realizar tareas específicas y aplicación de conjuntos de funciones secuenciales programadas en base a archivos de *procesamiento por lotes* o *macros (batch files* en inglés).

ILWIS integra funciones para realizar procesamiento de imágenes digitales y análisis espacial, utilización de bases de datos tabulares y características convencionales de SIG. La adquisición de

datos de imágenes aeroespaciales, es una parte integral de ILWIS, ellas permiten la obtención de información para un *monitoreo* efectivo (ILWIS, 1993:1.1).

El sistema está diseñado pensando en que no todos los usuarios de ILWIS tienen un amplio conocimiento sobre computación. Es por esto que todas las operaciones son realizadas mediante un menú *amigable* con estructura de ramas de árbol (desde el menú más general hasta los submenús más específicos). Los usuarios experimentados pueden realizar operaciones en ILWIS a través de comandos en línea. A continuación se presentan los principales conjuntos de funciones que se integran en los módulos del sistema mencionado:

Funciones para introducción y conversión de información: Estas funciones se realizan con un conjunto de programas de conversión de formatos, los cuales permiten la *importación* y *exportación* de datos de imágenes obtenidas con percepción remota, datos tabulares, mapas *raster* y archivos de vectores (segmentos o arcos) a partir de diferentes estructuras generadas por otros sistemas de información. En este módulo es posible integrar al SIG información gráfica mediante la digitización de rasgos de un mapa sobre una tableta digitizadora. Una función que es muy útil principalmente en la fase de trabajo interactivo con el SIG, cuando se realiza interpretación visual en pantalla, es la función denominada *digitización en pantalla* (*screen digitizing*), la cual permite digitizar con el cursor de la tableta, teniendo como *imagen de fondo* un mapa o una imagen.

Funciones para el modelamiento espacial: Es posible realizar procedimientos complejos de modelamiento espacial utilizando el calculador de mapas (*map calculator*) de ILWIS, el cual permite la aplicación de funciones matemáticas (aritméticas, trigonométricas, potenciales, logarítmicas, etc.), de comparación, condicionales, operadores booleanos, funciones y operadores de vecindad, aplicación de tablas de clasificación, etc. Con la posibilidad de integrar simultáneamente bases de datos tabulares y espaciales. Se pueden realizar, con el calculador de tablas (*table calculator*), consultas (*queries*), cálculos y análisis estadísticos simples. Funciones de aplicación rápida, de sobreposición y *cruzamiento*, con mapas en formato *raster* es posible hacerlas con este módulo del sistema.

Funciones para el procesamiento de imágenes digitales: Este sistema también tiene la posibilidad de usar funciones estándares para el procesamiento de imágenes digitales, integrándolas con modelamiento espacial y manejo de bases de datos tabulares. Al tener recientemente estas posibilidades de unir las funciones mencionadas se acrecenta la potencialidad de este sistema. Se cuenta con funciones que permiten la interpolación en formato *raster* a partir de puntos y líneas de curvas de nivel con el objetivo de crear los modelos digitales de terreno (conocidos generalmente como *DTM* de *digital terrain model*). Filtros de convolución lineal estándares, conjugados con funciones incluidas originalmente en el sistema, permiten la aplicación de los *DTM* para la generación rápida de mapas de pendiente, de relieve sombreado, de exposición de laderas, de concavidad-convexidad de laderas, de altitudes, etc.

Existen además una serie de funciones de *ILWIS* las cuales están contenidas en el módulo *Vector*, las cuales por ejemplo, permiten internamente la conversión de formatos vectorial a *raster* y viceversa (*vectorizar*), análisis de redes fluviales, cambios de proyecciones cartográficas, selección de características de los mapas ya creados, *limpieza* de errores de los archivos de segmentos, etc.

Finalmente en un último módulo, el de salida de los datos resultantes (*Output*), existen las funciones de conversión de formatos (*raster*, vectorial y tabular) de estructura ILWIS a las de otros SIG. Aquí, además se tienen las funciones de edición cartográfica de los mapas resultantes (simbología, leyenda, escala, texto, etc.) y la posibilidad de enviarlos después de la edición a un periférico de impresión (diversos tipos de impresoras y graficadores).

0.6 INTRODUCCIÓN A LOS ESTUDIOS DE CASO.

Para tener una idea más clara de la potencialidad de realizar análisis geográfico con un SIG, se ha considerado importante incluir en este trabajo los resultados de proponer y aplicar metodologías en tres diferentes estudios de caso. Estas aplicaciones están relacionadas con evaluaciones de recursos naturales, medio ambiente y geomorfología, que se han realizado en el Instituto de Geografía de la UNAM. El procesamiento de la información, en los tres estudios de caso presentados en esta tesis, se hizo en la versión 1.3 de ILWIS. Información complementaria relacionada con dichas aplicaciones se puede encontrar en las referencias bibliográficas señaladas en cada caso.

Los estudios de caso presentados en la tesis, se han caracterizado, sobre todo, de acuerdo a las funciones empleadas y al nivel de complejidad del análisis realizado (ver parte 0.2.3) de acuerdo a la metodología aplicada en el manejo y procesamiento de la información con el SIG. Dichos estudios se pueden definir de acuerdo al objetivo del análisis de la información en los siguientes rubros:

En el primer caso se presenta un estudio de cambios para definir tendencias, al cuantificar el avance de la erosión en cárcavas (rasgos geomorfológicos resultado de la erosión acelerada de suelos), procesando en el SIG imágenes obtenidas con una cámara de video convencional, para determinar las áreas de suelo perdidas y las longitudes máximas de avance, durante los lapsos considerados. La metodología empleada en este trabajo se apoya fundamentalmente en el uso de la videografía, como una forma particular de aplicación de la teledetección y SIG.

Las imágenes fueron obtenidas con una cámara de video convencional, utilizando un globo aerostático inflado con helio y volando entre 13 a 200 m de altura, en el municipio de Huasca, Hidalgo. La cuantificación del avance de la erosión se realizó al conjugar los límites digitizados de las cabeceras para todas las imágenes consideradas. Se obtuvieron imágenes con cinco fechas diferentes para el sistema de cárcavas 1 y tres para el sistema 2, previas, durante y posteriores a la temporada de lluvias, con el fin de comparar información multitemporal y así establecer el crecimiento de los rasgos de erosión. El método empleado demuestra la posibilidad de obtener información con el grado de detalle necesario para los objetivos específicos dependiendo de las características de los rasgos a evaluar.

En este estudio se aplicaron diversas funciones de procesamiento de imágenes digitales, por ejemplo, mejoramiento de contraste, filtrados, asignación de colores, etc. Además se realizó la georreferenciación de las imágenes y su corrección geométrica, a partir de las coordenadas calculadas, de los puntos de control establecidos en el levantamiento topográfico. La definición del avance de la erosión en cárcavas en los ejemplos seleccionados, por último, fue establecida por la sobreposición de resultados obtenidos para cada imagen. Mediante el programa de digitización en pantalla se delimitaron en las imágenes secuenciales de una misma cabecera de cárcava, sus límites.

En el estudio de caso 2 se obtuvo una evaluación de las tendencias de cambios y de las características morfológicas y de distribución de los predios en uso agrícola y forestal del suelo, en la Cuenca Alta del Río Temascaltepec (laderas oeste y suroeste del Nevado de Toluca). Se consideraron las variables: altitud, pendiente y superficie de los predios. Además se evaluó el cambio de uso del suelo para el período entre 1972 y 1988, utilizando la cartografía temática escala 1:50,000 y de los fotomapas 1:20,000 con su base de datos tabular respectiva.

Se determinaron, mediante las funciones incluidas en el submódulo de *calcula con mapas*, utilizando las funciones de *cruzamientos*, la superficie y porcentaje, con respecto al área total de la cuenca (bosque, agricultura, pastizal, erosión, etc.), según intervalos altitudinales. Se obtuvieron, a partir de las bases de datos generadas con los cruzamientos mencionados, los

parámetros de descripción estadística de los valores de pendientes en áreas agrícolas y de superficie de los predios agrícolas por comunidad. Las principales funciones del SIG empleadas fueron:

- El módulo de entrada de datos al digitizar la información altitudinal, curvas de nivel a cada 20 m, a partir de las cartas topográficas escala 1:50,000. Se digitizaron también los límites de los predios forestales y áreas agrícolas y se crearon los polígonos. Se generó el mapa de curvas de nivel en formato de celdas o *raster* y la posterior interpolación del mismo para la creación del modelo digital del terreno (MDT).

- Se aplicaron al *MDT* los *filtros de convolución lineal* para la obtención de los valores de pendiente y orientación de laderas. Aplicación de *tablas de clasificación* para la obtención de mapas finales por intervalos de valores. Además se realizaron sobreposiciones y *cruzamientos* de los mapas de pendientes y altitudes con los de predios agrícolas y forestales de acuerdo a la información digitizada a partir de las ortofotos y mapas mencionados.

En el estudio de caso 3 se ejemplifica el método y los resultados finales de la aplicación, de los criterios para la realización de evaluaciones geomorfológicas analíticas y sintéticas, con el fin de delimitar unidades ambientales físicas o de *Regionalización Ecológica*, manejando y analizando la información dentro del contexto de un SIG. Se utilizaron estas unidades como el principal marco de referencia geográfico para definir posteriormente sus aptitudes de uso del suelo. Los resultados de este estudio sirvieron para el establecimiento de las propuestas de estrategias de manejo de los recursos naturales en el municipio de Los Cabos, B.C.S., en el proyecto de ordenamiento ecológico para esta entidad administrativa (SEDUE-OEA, 1992).

Se aplicaron las funciones de procesamiento y transformación de las bases de datos espaciales y no-espaciales del SIG en la delimitación de las unidades geomorfológico-ambientales. Principalmente, en la fase de trabajo *interactivo* con el SIG, se empleó la función denominada *digitización en pantalla*, y teniendo al mapa de relieve sombreado, generado con el modelo digital del terreno, como *imagen de fondo*.

Utilizando el cursor de la tableta se trazaron en pantalla los límites de las unidades ambientales, al sobreponer y desplegar alternativamente sobre el mapa de relieve mencionado, los segmentos capturados de los mapas temáticos digitizados con anterioridad. Aquí se empleó principalmente la capacidad analítica de los SIG para sobreponer y cruzar varias capas de información.

A continuación se exponen a detalle, los objetivos, procedimientos y resultados obtenidos en cada uno de los tres estudios de caso. Estos fueron elegidos para ser presentados aquí, sobre todo por el nivel de avance general que se ha tenido en su implementación y porque ejemplifican de mejor manera, las posibilidades de aplicación de un SIG, en las disciplinas involucradas en cada uno de tales estudios (geomorfología, regionalización ambiental y evaluación de recursos).

ESTUDIO DE CASO 1.

Evaluación del crecimiento de cárcavas en cárcavas, mediante el procesamiento de imágenes multitemporales de video, obtenidas desde un globo aerostático: El caso de Huasca, Hidalgo.

RESUMEN

El uso de imágenes digitales de video con fines de evaluación del terreno ha ido adquiriendo mayor importancia en los últimos años. En este trabajo se han procesado esa clase de imágenes, con el fin de cuantificar el avance de las superficies y longitudes máximas de suelo perdidas por erosión. La metodología empleada se apoya fundamentalmente en el uso de videografía y SIG. Las imágenes fueron obtenidas con una cámara de video convencional, utilizando un globo aerostático inflado con helio y volando entre 13 a 200 m de altura, en el municipio de Huasca, Hidalgo. Se obtuvieron imágenes con cinco fechas diferentes, previas, durante y posteriores a la temporada de lluvias, con el fin de comparar información multitemporal y así establecer el crecimiento de los rasgos de erosión. Se procesaron dentro del un SIG mediante procedimientos convencionales. La cuantificación del avance de la erosión se realizó al conjugar los límites digitalizados de las cabeceras, para todas las imágenes seleccionadas.

En relación a la intensidad espacial de los procesos, estos no se presentan homogéneamente en toda la cabecera, se expresan en forma diferenciada, a partir principalmente de la caída de *paquetes de suelo*, aunque la tendencia general del avance hace que se presente mayor dinámica en el extremo superior del eje longitudinal de la cárcava. Las resoluciones espaciales obtenidas tuvieron el detalle suficiente para ser empleadas en la cuantificación del desarrollo de cárcavas. Los tamaños de *pixeles* para las imágenes procesadas fueron de 1.2 hasta 4.7 cm. Las precisiones alcanzadas con el método propuesto, superaron las obtenidas a partir de las mediciones directas en campo.

Mediante el método propuesto es factible definir y cuantificar la superficie erosionada de suelo y delimitar en una misma cárcava las áreas más dinámicas. Los procesos de erosión presentaron cambios en las tasas de avance, en función del lapso considerado y de la etapa del año en que fueron tomadas las imágenes. Se concluye a partir de las diferencias obtenidas, que la mejor alternativa es la realizada con videografía digital, debido sobre todo al grado de detalle que se tiene, a las precisiones alcanzadas y a la posibilidad de interpretación de la información digital gráfica del terreno.

1.1 INTRODUCCIÓN.

Uno de los orígenes y efectos más importantes de la degradación ambiental en México es, sin duda alguna, la erosión acelerada de suelos. Este proceso geomorfológico tiene consecuencias directas, tanto en aspectos de carácter social y económico, como directamente con los que se relacionan a las condiciones ambientales y ecológicas, particularmente con la estabilidad y productividad de los ecosistemas.

Por un lado, los efectos del fenómeno mencionado, repercuten principalmente en las condiciones socioeconómicas de la población del país que padece la pobreza más extrema (población del espacio rural). Esto se relaciona sobre todo con la pérdida continua y acelerada de uno de sus recursos principales. Esto es, el efecto de los procesos de erosión acelerada de suelos, influye directamente en la reducción continua de áreas con posibilidades de aprovechamiento del suelo en

general, particularmente para fines de producción agrícola, y más específicamente para fines de agricultura de subsistencia.

Por otro lado el fenómeno de la erosión acelerada de suelos no sólo es causa sino también efecto, es decir, son procesos desencadenados y/o acrecentados, debido a las perturbaciones ambientales que las comunidades humanas han ocasionado, desde tiempos históricos, de acuerdo a sus diversas formas e intensidades de apropiación de los recursos.

Un segundo aspecto del problema, en un contexto más general y de repercusiones de carácter económico, es el que se relaciona con el uso del suelo para la producción agrícola y pecuaria en el país, es decir, los procesos de erosión acelerada conducen a la reducción de las áreas agrícolas y de su potencialidad productiva en relación a la posibilidad de generar alimentos. De acuerdo a diversos estudios generales, en los que se utilizaron diferentes métodos de aproximación, para la estimación de las coberturas de áreas con problemas de erosión, se han reportado cifras alarmantes, que van desde un 71% hasta un 98% del área total del país con evidencias de diversos grados de erosión acelerada (Mass y García-Oliva, 1990:28-29).

El problema de la erosión de suelos, también tiene relación con las características de uso del suelo, y de las formas de apropiación tradicional, de los recursos naturales de la población rural de México. Los efectos de los procesos erosivos se evidencian más claramente, en los sitios donde las condiciones para la agricultura y las actividades pecuarias son las menos propicias, esto es, hay una relación estrecha entre la presencia de formas de erosión acelerada de suelos y áreas de sobrepastoreo, agricultura de temporal, tierras abandonadas, etc.

Un tercer aspecto del problema, es la relación de formas de erosión acelerada y las características físicas de los ambientes en donde se presentan. Se ha encontrado una relación empírica característica, entre la presencia de tales formas y las clases de suelos con horizontes arcillosos, particularmente en luvisoles (clasificación FAO 1970, ver Bocco, 1986:57-58 y Palacio-Prieto, 1990:49). En el Centro y Centro-Occidente de México existen muchos y diversos ejemplos de ello: el área cercana a Mazamitla, Jalisco; asimismo al norte y noreste de Temascaltepec, Estado de México; cerca de Calpulalpan, también Estado de México; en Tlalpujahua y El Oro; hacia el sureste de Taxco, Guerrero; en las laderas, hacia el sur del Lago de Pátzcuaro, Michoacán; en Xicotepetec en la Sierra Norte de Puebla, etc.

Para evaluar los efectos de la erosión de suelos, en relación a los aspectos mencionados, es necesario en primer lugar hacer un inventario o definición con suficiente precisión, con varios niveles de análisis, de las áreas que presentan el fenómeno mencionado. Y no sólo eso, sino que después de cuantificar con precisión adecuada la magnitud de las áreas erosionadas en el país, habría que definir las áreas activas e inactivas, la intensidad de los procesos, el establecimiento de una tipología de formas erosivas en cuanto a morfología, materiales (tipos de suelos) y procesos generadores.

Por otro lado, enfocándose ahora en los aspectos técnicos del problema, es importante decir que la primer actividad a realizar para la evaluación con suficiente precisión de las áreas afectadas por erosión de suelos, está relacionada directamente con las características de la información existente para hacer tal evaluación.

Algunas de las fuentes de información más importantes para la evaluación y caracterización del fenómeno son, tradicionalmente, las fotografías aéreas y más recientemente los productos generados a través de la tecnología de la percepción remota (imágenes obtenidas desde satélites y aeronaves principalmente). Debido a que los efectos del problema se presentan físicamente en el terreno, con cambios drásticos en lapsos cortos, es necesario contar en principio con información reciente y a suficiente detalle para hacer evaluaciones adecuadas.

En este contexto se puede decir que, desde hace mucho tiempo, la interpretación de fotografías aéreas y, más recientemente, el procesamiento en computadora de imágenes multiespectrales digitales, obtenidas por sensores instalados en satélites y plataformas aéreas (aviones, helicópteros, globos, grúas, etc.), son técnicas de uso común que utilizan los especialistas de diversas disciplinas y con diferentes fines, particularmente los que se relacionan con las evaluaciones ambientales y de recursos naturales (ver Verstappen, 1977, 1983, 1992 y s/fecha).

Algunos ejemplos en donde tales fotografías e imágenes son de frecuente aplicación son: la cuantificación del avance de los procesos erosivos, los inventarios de áreas con uso agrícola y forestal, la evaluación de recursos minerales, el pronóstico de las condiciones atmosféricas, la planificación de medidas de atenuación ante desastres naturales, etc.

No obstante que la información contenida en las imágenes de satélite es de alta resolución espacial (tamaño del pixel) como espectral (bandas definidas por límites de longitudes de onda del espectro, recibidas por los sensores), especialmente las generadas por los satélites LANDSAT y SPOT, existen algunos inconvenientes que particularmente en países en desarrollo, han impedido su aplicación en amplios sectores de usuarios.

Específicamente, entre estos inconvenientes destacan los altos costos de las imágenes en formato digital (alrededor de USD 4000) y los tiempos de adquisición y utilización de tal información, que llegan a ser, en la mayoría de los casos, de algunos meses.

Como resultado de los inconvenientes señalados, se ha buscado generar productos con tecnologías alternativas que, además de tener un costo inferior al de los productos satelitarios y aéreos señalados, permitan contar de manera rápida con información oportuna. A este respecto, puede señalarse para este caso la obtención y procesamiento de imágenes convencionales de video obtenidas desde plataformas aéreas, en este caso un globo aerostático.

1.2 ANTECEDENTES.

Los principales antecedentes que se han consultado y que han sido reportados en la literatura especializada se pueden separar, por un lado, en relación a los aspectos de medición de las formas de erosión (geomorfología dinámica-cuantitativa) y por otro, en relación a los aspectos del uso de imágenes obtenidas con cámaras convencionales y especiales de video (videografía), para fines de evaluación de recursos naturales y para el planteamiento de soluciones a problemas ambientales. A continuación se hace una síntesis de los trabajos consultados, separándolos de acuerdo a los aspectos a los que se hizo referencia anteriormente.

1.2.1 Referencias de trabajos relacionados con la cuantificación a detalle del avance de la erosión y con inventarios de erosión.

Sobre los aspectos del seguimiento y medición a detalle, de los rasgos de erosión acelerada de suelos, existen algunos antecedentes que es importante mencionar, sobre todo porque al referirse a ellos puede quedar claro cuál ha sido la evolución que se ha seguido en el desarrollo de métodos, técnicas y tecnologías utilizados para evaluar el fenómeno mencionado.

1.2.1.1 Aplicación de técnicas de medición directa.

Durante mucho tiempo se han utilizado técnicas *tradicionales* o de medición directa para evaluar los rasgos y avance de los procesos erosivos acelerados. Tales técnicas se han basado principalmente, en la medición continua de marcas fijas situadas en el terreno, clavos, estacas,

corcholatas, rondanas, etc., o bien la medición consecutiva de perfiles transversales (seccionamiento), poligonales y/o triangulaciones, en diversos sitios del rasgo a evaluar (ver Harvey, 1982; Schouten y Rang, 1984; Blong, 1985).

Con esos métodos es posible, dentro de los procesos de erosión acelerada de suelos, cuantificar diferentes parámetros de esos rasgos y procesos, es decir medir por ejemplo la extensión (a partir del mapa de inventario), los tipos, las intensidades, los volúmenes removidos, las longitudes máximas de avance en el tiempo, el movimiento y cantidades de partículas en el interior del suelo, etc. En este trabajo se consideraron solamente la cuantificación en el tiempo de las áreas de suelo perdidas y las longitudes máximas erosionadas en las cabeceras de las cárcavas, particularmente en las áreas definidas como las más afectadas o las de mayor dinámica.

Las técnicas antes mencionadas son de aplicación laboriosa y costosas en cuanto a utilización de tiempo y recursos, además de que los datos que se obtienen son muy limitados en relación al cubrimiento de información, ya que solamente se pueden registrar cambios a nivel puntual y lineal, es decir no es posible hacer un seguimiento para definir, qué tan significativos son, los cambios que ocurren en áreas completas y amplias.

Goudie *et al.* (1990:195) menciona que las primeras mediciones sistemáticas de tasas de erosión hídrica de suelos se hicieron en parcelas experimentales en Utah en 1912 y en la Estación Agrícola Experimental de Missouri en 1917. El autor hace una revisión histórica de las diferentes metodologías y técnicas empleadas para la medición de la erosión y el intemperismo, así como de los procesos que se presentan en las laderas (*op.cit.*:195-259).

Bennett (1939) incluye algunas de las primeras referencias de mediciones sistemáticas sobre tasas de erosión en algunos sitios de Estados Unidos, presentando los resultados de cuantificar volúmenes de materiales removidos en parcelas experimentales.

En Harvey (1992), se reporta un trabajo muy amplio y detallado (en términos de tiempo y procesos de desarrollo de los sistemas de cárcavas) acerca del seguimiento que ha hecho este autor durante el lapso de 1969-89, en las cabeceras de las cárcavas en las laderas de las colinas de Howgill Fells, en el noroeste de Inglaterra. Harvey utilizó tanto medidas tradicionales realizadas en campo como en fotografías convencionales tomadas en el terreno, desde los mismos sitios de monitoreo a partir de puntos de control fijos. También en Blagovolin y Tsvetkov (1972), Saunders y Young (1983), Boardman *et al.* (1990) y Boodt y Gabriels (1980), se presentan resultados de los seguimientos realizados con diversos métodos de evaluación.

En México, Bocco *et al.* (1990) utilizaron un método topográfico directo, a partir del levantamiento en campo de secciones transversales equidistantes, para la caracterización del crecimiento de las cárcavas. En gabinete realizaron la configuración de curvas de nivel a partir de interpolación manual (considerando las alturas puntuales en las secciones). Esto como base de datos espacial para el desarrollo de un sistema de información de cárcavas.

1.2.1.2 Aplicación de técnicas de medición indirecta.

Como ejemplos de utilización de técnicas *no tradicionales* (métodos indirectos) para el seguimiento y medición de rasgos de erosión se pueden citar muchos trabajos. Algunos de los más conocidos se comentan a continuación.

Morgan *et al.* (1980), utilizaron fotografías en color y en infrarrojo en color, en formato de 70 mm y a escala 1:60,000 (tomadas en 1977 y 1978), para determinar los factores de uso agrícola del suelo (C) y de técnicas para el control de la erosión (P) dentro de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE).

Morgan y Nalepa (1982), utilizaron fotografías aéreas infrarrojas en color a escala 1:40,000 (de junio de 1980 y de 1981), para la fotointerpretación de uso del suelo con verificación simultánea en campo, con el objetivo de delimitar áreas que superaran los límites tolerables de pérdida de suelo por erosión hídrica, en función de la aplicación de la USLE.

Welch *et al.* (1984), utilizaron técnicas fotogramétricas para evaluar la erosión en cauces a partir de fotografías, tomadas desde una plataforma de 9.5 m sobre el terreno, antes y después de eventos de tormenta. Utilizaron cámaras convencionales de bajo costo (35 y 70 mm). A partir de la interpolación de 100 puntos, distribuidos aleatoriamente en el área estudiada, obtuvieron mapas de isolíneas a cada 25 cm, con los cuales se calcularon en computadora los cambios de volumen.

Dymond y Hicks (1986), utilizaron fotografías aéreas a escala 1:17,500 de 1950 y 1:12,000 de 1981, para la evaluación de los cambios de volumen de material transportado (erosionado) y depositado, en el interior de una cuenca hidrográfica, para el lapso mencionado. Utilizaron técnicas fotogramétrico-analíticas para la obtención del modelo digital del terreno (red de puntos a cada 4 m) y perfiles transversales al cauce principal.

Stephens *et al.* (1982), utilizaron fotografías aéreas secuenciales (desde 1944 hasta 1980, cinco fechas) en escalas variables, entre 1:15,800 hasta 1:63,000, para detectar y monitorear cambios en algunos parámetros involucrados con la erosión del suelo en áreas agrícolas. El procesamiento de la información mostró que en los lugares donde no han sido establecidos sistemas de conservación de suelos y sufren un cambio de uso, se producen incrementos en cinco veces en la tasa de erosión anual promedio. Las mediciones de los cambios fueron realizadas con un planímetro electrónico.

Spomer y Mahurin (1984), elaboraron mapas con curvas de nivel a cada 15 y 30 cm en escalas de 1:120 y mapas especiales en 1:24 para evaluar erosión laminar y en cárcavas, basándose en fotografías obtenidas desde una grúa a una altura máxima de 21 m sobre el terreno.

Thomas *et al.* (1986) y Thomas y Welch (1987), calcularon la erosión del terreno a partir de mapas en escalas entre 1:240 a 1:360, con curvas de nivel equiespaciadas entre 15 y 30 cm, realizados a partir de fotografías aéreas secuenciales obtenidas entre 180 a 275 m de altura sobre el terreno. La exactitud en el trazado de las curvas fue menor a ± 25 mm. Los puntos de control fotogramétrico fueron establecidos a partir de levantamientos topográficos convencionales.

Jackson y Ritchie (1987), utilizaron un "perfilador" laser (*profiler* en inglés) desde una avioneta con el fin de realizar mediciones de surcos de erosión o canales (en inglés "rills" o "ephemeral gullies") desarrollados sobre parcelas experimentales, las alturas de vuelo (entre 50 y 200 m sobre el terreno) permitieron obtener exactitudes del orden de los 6.5 cm en las mediciones. Con el mismo método, se realizaron mediciones de las características de la superficie del terreno relacionadas con procesos erosivos e hidrológicos (Ritchie *et al.*, 1992). En este caso se usó un "perfilador" laser que genera 4,000 impulsos por segundo con longitud de onda de 0.904 micrómetros y exactitudes de las medidas verticales estimadas en 5 cm, por medida individual. Con este método se obtuvieron localización, anchura y profundidad de las cárcavas, volando a alturas entre 100 y 200 m, complementando el estudio con imágenes de video.

Mills y Keating (1992), utilizaron restitución fotogramétrica de fotografías aéreas a escala 1:12,000 para la obtención de mapas y volúmenes de materiales erosionados y depositados en las laderas del Monte Santa Helena (USA), en cinco fechas diferentes, desde 1980 (después de la erupción) hasta 1988, generando y procesando los modelos digitales del terreno en un SIG. El error estimado en la componente altitudinal fue de menos de 1 m.

Estudios de erosión de suelo, a nivel de inventario de áreas pequeñas, fueron y se están llevando a cabo en el Centro de México a partir de la interpretación de fotografías aéreas convencionales, en

diversas escalas. Por ejemplo Bocco (1989) utilizó fotografías a escala 1:50,000, Romero-Terán (1989:18) a 1:25,000 con dos fechas (1953 y 1981), Palacio-Prieto, (1990:47) a 1:25,000, Vázquez-Selem, (1992:5) a 1:25,000, Gutiérrez-Valdéz, (1989) a 1:20,000 y Ugalde-Rivera (tesis en proceso) a 1:20,000.

1.2.1.3 El uso de imágenes de satélite y fotografías aéreas para el inventario regional y local de la erosión en México.

A partir de 1972, con el desarrollo del programa LANDSAT, el uso de imágenes digitales obtenidas desde satélites, se vuelve frecuente en el estudio y evaluación de los recursos naturales en general, incluyendo estudios sobre erosión de suelos. Dadas las características de las imágenes Landsat MSS (resolución espacial de 79 x 79 m), estos productos han sido utilizados en nuestro país en la realización de inventarios de áreas erosionadas a nivel regional (Bustamante, 1977; González y González, 1977; Trueba *et al.*, 1984).

Los productos comercializados del programa estadounidense LANDSAT (Mapeador Temático TM y próximamente el Mapeador Temático Mejorado TME) y la incorporación de productos de mayor resolución espacial del programa francés SPOT, con resoluciones, el primero de 30 x 30 m y el segundo de 20 x 20 m en el modo multiespectral y 10 x 10 m en el pancromático, además los del programa japonés con el satélite JERS-1 que posee dos sensores ópticos (18.3 x 24.2 m) y un radar de apertura sintética (18 x 18 m, datos reportados en RESTEC, s/fecha), han permitido la realización de inventarios y estudios sobre erosión de suelos de manera significativamente más precisa, pasando, del nivel regional, a la evaluación del fenómeno a detalle en el nivel local (ver por ejemplo, Bocco y Valenzuela, 1988; Bocco, 1990).

Conjugado a la obtención de las imágenes digitales referidas, el desarrollo de programas automatizados en computadora para su procesamiento ha sido notable, sobre todo ahora, en que la tendencia general es integrar módulos de procesamiento de imágenes digitales, dentro de la estructura más amplia de manejo y análisis de información, de los sistemas de información geográfica (Valenzuela, 1988; Valenzuela y Weir, 1989; Meijerink, 1990; ILWIS, 1992:1.1-1.2).

Se concluye, de los párrafos anteriores, que un punto crítico en la aplicación de los productos señalados (fotografías aéreas e imágenes digitales obtenidas desde aeronaves y satélites) depende en gran medida de su escala.

En estudios de detalle, las fotografías aéreas de escalas medias (1:25,000-1:50,000) y sobre todo las imágenes obtenidas a partir de sensores instalados en satélites (imágenes con resolución de los rasgos del terreno en escalas normalmente menores), pueden no contener el suficiente detalle, para permitir el monitoreo continuo de la erosión hídrica de suelos, en sus diferentes modalidades, laminar, en cárcavas, en canales o arroyuelos (rills), por salpicadura, etc. Además, los costos de adquisición tanto de los diferentes juegos de fotografías del área de interés (en caso de existir), como de las imágenes de satélite, pueden constituir un serio impedimento para su utilización.

La aplicación de estas tecnologías se realiza, igualmente, en el estudio y evaluación de fenómenos cuyas características son, en distinto grado, variables en el espacio y en el tiempo. Por ello, es necesario un seguimiento continuo de dichos fenómenos, para lo cual es preciso contar con fotografías y/o imágenes de satélite secuenciales que refieran la dinámica del fenómeno estudiado.

El crecimiento de ciudades, los cambios en el uso del suelo forestal a agrícola, el avance de la erosión de suelos y la desertificación, así como algunos cambios rápidos en la morfología de la línea de costa, son algunos casos en donde el seguimiento y evaluaciones a través de información cartográfica, fotografías aéreas e imágenes digitales se han realizado (Ortiz-Pérez, 1985; Singh, 1986; Dirzo y García, 1992; Villers-Ruiz y López-Blanco, 1992; Liu *et al.*, 1993).

El uso de fotografías e imágenes obtenidas por satélites en la evaluación de fenómenos dinámicos, como los señalados en el párrafo anterior, implica sin embargo, problemas de carácter técnico y económico que deben ser tomados en cuenta. Por un lado, es frecuente que se presente el problema, que para el área particular de interés, no exista cubrimiento suficiente con información, para establecer comparaciones temporales y espaciales, lo cual haría necesaria la realización de vuelos específicos para obtener las fotografías aéreas.

En el caso de imágenes de satélite el panorama es, en muchos casos diferente, ya que a partir del lanzamiento del satélite ERTS-1 (LANDSAT-1), en 1972, se cuenta con material que cubre, prácticamente, a todo el país. Así se tiene que, desde el punto de vista temporal, las imágenes obtenidas por satélite se restringen a los últimos 20 años, mientras que es posible encontrar fotografías aéreas de diversas porciones del territorio nacional desde los años treinta; así pues, las fotografías aéreas y las imágenes pueden, en caso de ser disponibles, complementarse para llevar a cabo el monitoreo de fenómenos de interés.

Por otra parte, es importante abundar un poco más en relación a señalar algunos aspectos económicos al respecto de estos productos.

En la Tabla 1.1 se muestra un análisis comparativo de los costos de algunos productos digitales obtenidos desde satélites, fotografía aérea convencional y videografía. Se puede ver que los productos satelitarios digitales "tradicionales" fluctúan entre 3,300 y 4,400 USD por escena, la fotografía multispectral satelitaria digitizada entre 1,900 y 2400 USD (con diversas resoluciones).

Se puede ver también que el costo más alto por km² corresponde para la fotografía aérea, sin embargo hay que decir que el costo es más bajo cuando se trata de fotografías ya existentes, entre 4 y 20 USD, dependiendo de la fecha de vuelo, escala y si se trata de información pancromática o en color. El costo para imágenes de video es comparable con el de productos satelitarios, aún cuando se puede reducir considerablemente al emplear un método como el tratado en este trabajo (globo aerostático).

Considerando las cifras mostradas antes, se puede inferir que en muchas ocasiones las limitaciones en la disponibilidad de recursos económicos, han impedido el tener acceso a estos productos, lo cual ha imposibilitado el llevar a cabo estudios de seguimiento de fenómenos dinámicos. Lo anterior ha dado lugar a la necesidad de buscar tecnologías alternativas de obtención de fotografías y/o imágenes con fines de evaluación y sobre todo de monitoreo del terreno. Entre dichas alternativas destaca la obtención de imágenes fotográficas y convencionales de video desde globos aerostáticos.

1.2.2 Antecedentes en el uso de imágenes de video y algunas referencias básicas en Videografía.

El uso de imágenes de video con fines de evaluación del terreno ha adquirido una importancia considerable en los últimos años, particularmente durante la década de los ochentas y ahora a principios de los noventas. Tal importancia ha conducido, por un lado, a que se considere a esas aplicaciones como parte de una nueva disciplina relacionada cercanamente con el uso de fotografías aéreas en fotogrametría, y por otro, con el empleo de imágenes en la percepción remota convencional, es decir, la realizada en plataformas satelitarias y en aeronaves. Por otro lado debido justamente a la importancia mencionada, se han creado comisiones específicas para el intercambio de conocimientos, difusión de trabajos y enseñanza de esa disciplina. Por ejemplo, la *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing* (ASPRS) ha organizado desde 1988 los Talleres de Videografía (*First Workshop on Videography*, ver ASPRS, 1988) y las Bienales de

Tabla 1.1 Comparación de costos de productos digitales: obtenidos desde satélites, fotografía aérea convencional y videografía.

Plataforma/Producto	Area Escena (km ²)	Resolución (m)	Costo Escena (USD)	Costo por km ² (USD)	Fuente
LANDSAT TM	31,450	30	4,400	0.13	+WM (1993)
SPOT Panc.	3,600	10	3,300	0.91	+WM (1993)
Resource F1 KFA-1000*	6,400	5	2,400	0.37	+WM (1993)
KFA-1000**	30,000	8	2,400	0.08	+WM (1993)
Resource F2 MK-4***	50,000	20	1,920	0.03	+WM (1993)
MOS-1 [!]	16,650	50	-----	-----	& RESTEC
JERS-1 [#]	7,425	18 x 24	-----	-----	\$ RESTEC
Foto Aérea	-----	.2 a .8	-----	23.30	\$ (1992)
Video/Helicóptero	-----	.8 a 3.5	-----	0.33 a 0.70	\$ (1992)

+WM= WORLDMAP (1993). *TIPO DE CAMARA PARA OBTENER FOTOGRAFIA SATELITAR, DIGITIZADA EN TIERRA (FSD CON 2 BANDAS ESPECTRALES, PRODUCTO RUSO, COMERCIALIZADO POR UN CONSORCIO USA/UK/RUSIA).

FSD (FOTOGRAFIA SATELITAR DIGITIZADA, 3 BANDAS ESPECTRALES). *FSD (FOTOGRAFIA SATELITAR DIGITIZADA, 8 BANDAS ESPECTRALES). & RESTEC (SIN FECHA). !MARINE OBSERVATION SATELLITE-1 (SATELITE JAPONES). #JAPANESE EARTH RESOURCES SATELLITE-1. \$ (1992)= PERALTA *et al.* (1992:7).



BIBLIOTECA
DR. JORGE A. VIVO

Fotografía Aérea en Color (ver ASPRS, 1989), en las cuales a partir de la onceava, se agregó la disciplina videográfica en el nombre del evento (*11th Biennial Workshop on Color Aerial Photography and Videography in the Plant Sciences*).

De la misma manera, la *American Congress on Surveying and Mapping (ACSM)* y la *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS)*, al igual que otras sociedades internacionales han establecido, sobre todo en los últimos congresos, espacios exclusivos para la presentación de trabajos relacionados con el tema (ver ISPRS, 1992 y ASPRS/ACSM/RT/92, 1992).

A esta nueva disciplina se le conoce actualmente como *Videografía* y en el caso que los objetivos del uso de imágenes de video sean con la finalidad de obtener mapas topográficos, a partir de restituciones en modelos estereoscópicos generados con imágenes tomadas consecutivamente, se le conoce como "*Videogrametría*" (Peralta *et al.*, 1992; 1993:10-11 e inédito).

Los primeros trabajos que refieren desarrollos de cámaras multiespectrales de video de alta resolución, con fines de aplicación en evaluaciones de recursos naturales y afectaciones en el medio ambiente, son los realizados por Rovinove y Skibitske (1967) y Mozer y Siege (1971), trabajos citados por Everitt y Escobar en 1992:117.

Más conocidos y específicos son los trabajos reportados por Mussakowski (1983), Vlcek, (1983), Vlcek y Cheung (1983) y Vlcek y King (1985). A partir de estos años se han obtenido imágenes digitales por medio de cámaras de video instaladas en aviones, con fines de evaluación de recursos naturales. Entre las ventajas de esta tecnología, de acuerdo a Vlcek y Cheung (1983), se refieren las siguientes:

1. Las cámaras de video tienen una alta sensibilidad a la luz y una amplia respuesta espectral, lo que puede permitir la obtención de imágenes en bandas del espectro electromagnético;
2. Las imágenes de video pueden ser vistas en tiempo real (es decir, en el momento de ser obtenidas);
3. La señal de video puede ser fácilmente digitizada en formato de 8 bits (fragmentada en formato de celdas o "*raster*" cuyos valores numéricos están entre 0 y 255), para su posterior análisis en medios computarizados.

A lo anterior puede agregarse que:

4. Al tratarse de equipo comercial, el material necesario es de fácil acceso y cuenta con un constante desarrollo tecnológico que permite tener acceso, conforme pasa el tiempo, a imágenes de mejor calidad.

No obstante las ventajas señaladas, es de llamar la atención la relativa poca difusión y utilización de esta tecnología en estudios de evaluación del terreno. En Latinoamérica, recientemente, se han realizado estudios y pruebas con el fin de hacer sistemática la obtención y el procesamiento de las imágenes de video y poner los resultados obtenidos así como tales imágenes a disposición de un amplio sector de usuarios de diversas disciplinas (ver a Talavera y Barrena 1991; Peralta A. *et al.*, 1991.; Peralta R. *et al.*, 1991; Peralta R. *et al.*, inédito; Palacio-Prieto y López-Blanco, 1992).

Si bien el análisis de estas imágenes tiene en este trabajo un fin particular (cuantificar el desarrollo de rasgos de erosión acelerada de suelos), los campos de aplicación de la tecnología mencionada son ilimitados.

1.2.3 Aplicaciones de imágenes de video en la evaluación de recursos naturales y medio ambiente.

Existen muchas referencias en la literatura especializada en donde se reporta el uso de diversos métodos, en los cuales se emplean cámaras, filtros e imágenes de video de diversos tipos para la evaluación e inventario de recursos naturales, en caracterización de condiciones de cultivos agrícolas, de clasificación de tipos de vegetación natural y sus condiciones ambientales, etc.

A continuación se hace referencia a los trabajos más generales, amplios y/o más representativos de estas disciplinas de aplicación. En el Apéndice A.1 se ha integrado una relatoría amplia de las fuentes bibliográficas que se han consultado sobre el tema.

Los autores más citados y que tienen la mayor cantidad de trabajos antecedentes sobre el tema son, principalmente, el grupo formado por J.H.Everitt, D.E.Escobar, P.R.Nixon, M.A.Alaniz y M.R.Davis, del Servicio de Investigaciones Agrícolas del USDA en Weslaco, Texas; D.Meisner del Laboratorio de Percepción Remota de la Universidad de Minnesota; J.Vlcek, E.Cheung y D.King de la Facultad de Estudios Forestales de la Universidad de Toronto; y últimamente D.L.Evans y R.C.Beltz del Servicio Forestal del USDA. Una síntesis de los trabajos más importantes y de cubrimiento amplio (en el sentido de aplicación y procesamiento) que han realizado algunos de los autores mencionados se presenta enseguida:

Mussakowski (1983), representa uno de los primeros antecedentes de aplicaciones de imágenes de video en evaluación de recursos naturales; presenta conceptos y elementos físicos básicos (equipo) para la aplicación de la videografía.

En Vlcek y Cheung (1983), también se encuentra uno de los antecedentes primarios de aplicaciones en los campos mencionados. En este texto los autores hacen una revisión de la potencialidad del análisis del territorio con videografía aérea y algunos aspectos relacionados con el análisis digital de imágenes.

Everitt y Nixon (1985a), evaluaron compuestos en falso color de imágenes de video de áreas de pastizales, al compararlos con fotos aéreas en infrarrojo color. Los autores concluyen que un sistema de video de falso color tiene un potencial considerable como una herramienta en percepción remota que ayuda en la evaluación de algunos de los recursos dentro de los ambientes semidesérticos.

Everitt y Nixon (1985b), utilizaron cuatro cámaras de video de sistema de tubo, en blanco y negro, una de ellas modificada para recibir información en longitudes de onda, desde el azul visible hasta el infrarrojo cercano. Su objetivo fue el de mostrar que ese sistema de video puede ser útil para evaluar algunas características seleccionadas de los recursos existentes en ambientes de pastizales semidesérticos (Sur de Texas).

Meisner y Lindstrom (1985), utilizaron una cámara de color de tres tubos, los cuales reciben imágenes espectrales en el verde, rojo e infrarrojo, respectivamente. Hacen una recopilación de las ventajas y desventajas que consideran más relevantes en el uso de esa tecnología, respecto a esto concluyen que los sistemas de percepción remota con video imágenes no se pueden utilizar en todos los casos como herramienta óptima.

Richardson *et al.*(1985), utilizaron para la toma de las imágenes cuatro cámaras de video de tubo, cada una de ellas con un filtro espectral de "*banda angosta*". Este trabajo se hizo con el objetivo de diferenciar entre maleza y cultivos agrícolas, en crecimiento en parcelas experimentales, a partir de clasificaciones espectrales supervisadas, utilizando el algoritmo de clasificación de máxima verosimilitud.

Everitt *et al.* (1986), utilizaron imágenes tomadas con dos cámaras en blanco y negro, una sensible al visible y la otra al infrarrojo, con el fin de cuantificar fitomasa dentro de parcelas de pastos cultivados y fertilizados con cinco diferentes cantidades de nitrógeno. Ellos concluyeron que con el método empleado es posible evaluar la fitomasa en pastos.

Everitt *et al.* (1987), utilizaron tres cámaras de video en blanco y negro (BN) de tubos de 1", dos en el visible y una en el infrarrojo cercano. El objetivo de este trabajo fue el de evaluar imágenes de video para la detección de suelos salinos en terrenos agrícolas y áreas de pastizales, en el Sur de Texas.

Tal vez el trabajo más completo y amplio, de los consultados, en el sentido de las posibilidades de procesamiento digital de las imágenes multiespectrales de video es el de Vlcek *et al.* (1987). Ellos utilizaron un sistema de cuatro cámaras blanco y negro con sensor de CCD, alineadas ópticamente y sincronizadas. Realizaron clasificaciones supervisadas y no supervisadas, a partir del clasificador de máxima verosimilitud, además utilizando procedimientos estadísticos compararon las clasificaciones procesadas con los datos espectrales originales, con respecto a los obtenidos del análisis de componentes principales.

Wu (1989) describe un procedimiento para evaluar sistemas videogramétricos y además presenta un análisis preliminar de imágenes de video digitizadas, obtenidas con cámaras convencionales (visible) y especiales (infrarrojo-color).

Everitt *et al.* (1989), hicieron una clasificación de especies de plantas nativas (visual y espectralmente) para comparar con mapas ya existentes. Usaron imágenes de video aéreas en compuestos de infrarrojo-color y sus bandas individuales en B/N.

Stutte y Stutte (1989) usaron un sistema computarizado, para procesar modelos con imágenes de video, con fines de predicción, localización, clasificación y cuantificación de áreas *bajo presión* o "estresadas" en campos de cultivo.

Everitt y Escobar (1989) realizaron una revisión amplia sobre los diversos sistemas videográficos para aplicaciones en percepción remota, particularmente en la evaluación de recursos naturales. Clasificaron ocho tipos de sistemas videográficos que emplean diferentes técnicas, modelos y arreglos de cámaras y de filtros espectrales, los cuales han sido utilizados por diversos autores, especialmente con fines de evaluación de condiciones de plantas de cultivos agrícolas. Consideran diversas aplicaciones de las cuales las que más se mencionan son: Detección de daños por heladas en cítricos, medición de condiciones de pastizales semiáridos, estimación de cosechas en sorgo y maíz, diferenciación de especies de plantas en pastizales, detección de plantas de algodón dañadas por plagas de insectos, detección de problemas de salinidad en suelos, etc.

Richardson *et al.* (1989), usaron imágenes aéreas de video y valores de reflectancia tomados en el terreno que permitieron calcular valores de "*índices de vegetación perpendicular*", para relacionarlos con magnitudes de cosechas, así como índices de área de hojas y medidas de crecimiento de biomasa en las plantas.

Stutte *et al.* (1989), evaluaron diferencias en nutrientes en cultivos hortícolas, usando imágenes de video procesadas en ICAS (un procesador de imágenes), obtenidas con filtros en bandas angostas del visible e infrarrojo cercano.

Maggio *et al.* (1989), utilizaron fotografía aérea digitizada con un *barredor* ("scanner"), en infrarrojo en color e imágenes aéreas de video-fijo (en color), para evaluar parcelas forestales por tipo de explotación y su correspondiente delimitación por unidades de mapeo.

Reising y Lydiard (1989), realizaron una revisión y comparación de algunas características de los

sistemas de video multispectrales, en relación con las posibilidades de recepción de información espectral de los sistemas satelitarios de imágenes SPOT y LANDSAT.

Un aspecto importante de esta revisión bibliográfica es que a partir de su lectura han surgido algunas ideas de aplicaciones y también algunas aclaraciones acerca de las posibilidades reales de uso de esta tecnología para fines de análisis multispectral. Es importante destacar también que la mayoría de las aplicaciones que se han realizado corresponden a casos donde se evalúan aspectos de los recursos naturales que son resultado de las condiciones de manejo del suelo y de ambientes muy específicos; habría que tomar con cuidado estos métodos si se busca utilizarlos en ambientes diferentes.

1.2.4 Referencias relacionadas con la utilización de globos aerostáticos y fotografía aérea convencional en estudios de sitios arqueológicos.

En el ámbito científico existen numerosas referencias acerca de la obtención de fotografías desde globos aerostáticos con fines de estudios de sitios arqueológicos, desde las primeras décadas de este siglo hasta los años más recientes.

Por ejemplo Myers (1978) hace una revisión amplia del trabajo pionero de Guy (1932) y además presenta sus propios resultados de los vuelos realizados en diversos sitios en Grecia e Italia (también ver Whittlesey, 1967 y 1971; MASCA, 1969:2-3; Barba y Linares, 1990; Mims III, 1990). La utilización de cámaras de distintos tipos, incluyendo las convencionales de 35 mm e incluso cámaras de cine, fueron utilizadas para obtener fotografías de sitios arqueológicos a diversas alturas, con el fin de obtener vistas de conjunto que permitieran la confección de mapas y la evaluación del sitio.

1.3 OBJETIVOS E HIPOTESIS

En este trabajo se ha planteado el siguiente objetivo: Desarrollar un método que sea económico y tecnológicamente independiente, para la obtención de imágenes del terreno en formato digital, que no tenga como requerimiento básico la utilización de equipo costoso. Este método debe permitir evaluar, a partir del procesamiento en un SIG, las imágenes digitales de varias fechas y del mismo grupo de rasgos erosivos (cárcavas), para establecer finalmente, una secuencia del avance en el crecimiento de dichos rasgos.

Para ello se parte de la siguiente hipótesis de trabajo: la cantidad de información que se puede obtener de manera indirecta, a partir del análisis de imágenes convencionales y multitemporales de video, para la evaluación de fenómenos espaciales muy dinámicos, puede ser tanto o más amplia, precisa y poco costosa, que si lo comparamos con métodos *tradicionales* o de medición directa.

1.4 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA EN ESTUDIO

Para mostrar algunos resultados potenciales, de la obtención y procesamiento de las imágenes de video, en la evaluación y cuantificación de fenómenos de erosión acelerada de suelos, se muestra un ejemplo que incluye imágenes de dos sistemas (1 y 2) o grupos de cárcavas, los cuales se han desarrollado en el Municipio de Huasca de Ocampo, estado de Hidalgo, México; este municipio se localiza a unos 40 Km al noreste de la ciudad de Pachuca.

Específicamente, los sistemas de cárcavas (1 y 2) se localizan a unos cuatro kilómetros hacia el este de la cabecera municipal (Huasca), siguiendo por la carretera estatal que conduce hacia Tulancingo, Hidalgo, y a un kilómetro hacia el noroeste de la localidad de Los Reyes Tepetzala

(ver Figuras 1.1 y 1.2).

Considerando los aspectos fisiográficos, el municipio se localiza en el área de transición entre las provincias fisiográficas del Sistema Volcánico Transversal y la Sierra Madre Oriental, el primero formado por rocas volcánicas del Plioceno hasta el Pleistoceno y la segunda formada por rocas de origen marino del Mesozoico.

Desde el punto de vista geomorfológico morfogenético el área en estudio se caracteriza por las siguientes cuatro unidades principales: 1. Conos de escoria y mesetas lávicas basálticas (Cuaternario), 2. Piedemontes volcánicos del Pleistoceno y laderas lávicas de riolitas hasta basaltos (Plioceno-Cuaternario), 3. Laderas de montañas plegadas y barrancas tectonizadas de rocas sedimentarias marinas (Mesozoico) y 4. Planicies acumulativas de origen fluvial (Holoceno) (Romero-Terán, 1989:43).

En parte debido a la baja pendiente del terreno y a la presencia de suelos relativamente profundos, principalmente *Luvisoles*, se lleva a cabo una intensa actividad agrícola y de pastoreo en el municipio mencionado. Como consecuencia de las prácticas agrícolas inadecuadas, abandono de tierras y sobrepastoreo, se ha desarrollado en el área de estudio una densa red de cárcavas ("*badlands*" en inglés) o "*barranqueras*" (así nombradas localmente, Palacio, 1990:51).

Las cárcavas son incisiones en el terreno (son las superficies de los cauces con profundidad mínima de 50 cm, este límite fue establecido arbitrariamente para diferenciarlas de los "*rills*" o arroyuelos), son producto del fenómeno de erosión acelerada de suelos, las cuales se caracterizan por un desarrollo muy dinámico. Se han definido de muchas maneras, desde el aspecto de las actividades agrícolas, la FAO (1965) las define como rasgos de erosión que por sus dimensiones (anchura y profundidad) no se pueden modificar con las labores agrícolas normales y que además no permiten desplazarse sobre de ellas, es decir, ser "*recorridas*" transversalmente por los implementos de labor.

Para Mitchell y Bubenzer (1980:48-49) las cárcavas son comúnmente cauces profundos, con paredes muy inclinadas hacia aguas-arriba que se presentan normalmente en subsuelos erosionables y profundos, caracterizadas también por un retroceso continuo de su cabecera (avance hacia aguas-arriba) a partir de un flujo continuo de partículas y "*paquetes*" de suelo.

Algunas características importantes para definir a las cárcavas fueron establecidas por Imeson y Kwaad (1980), de ahí se tomaron las siguientes:

-Son formadas donde el agua es concentrada principalmente, pero no necesariamente, como resultado de perturbaciones antropogénicas directas e indirectas en el ciclo hidrológico.

-Su distribución espacial se limita principalmente a depósitos de materiales no consolidados en laderas,

La consecuencia del desarrollo de estas formas de erosión acelerada da lugar, en el corto plazo, a una disminución rápida de terrenos agrícolas y de pastizales y, en el mediano y largo plazo, a la pérdida total del suelo y al azolvamiento de cuerpos de agua (Fotos 1.1 y 1.2).

El fenómeno de la formación y desarrollo de las cárcavas, aún no ha sido explicado completamente, ni modelado en términos matemáticos. Existen algunos reportes y análisis que tratan sobre el tema, pero en muchos de ellos no se considera a las cárcavas como sistemas geomorfológicos complejos, en relación a los procesos que las generan, sino como resultado exclusivo de procesos fluviales (Bocco, 1991:403).



Figura 1.1. Mapa de localización del área en estudio, Municipio de Huasca de Ocampo, Hidalgo.

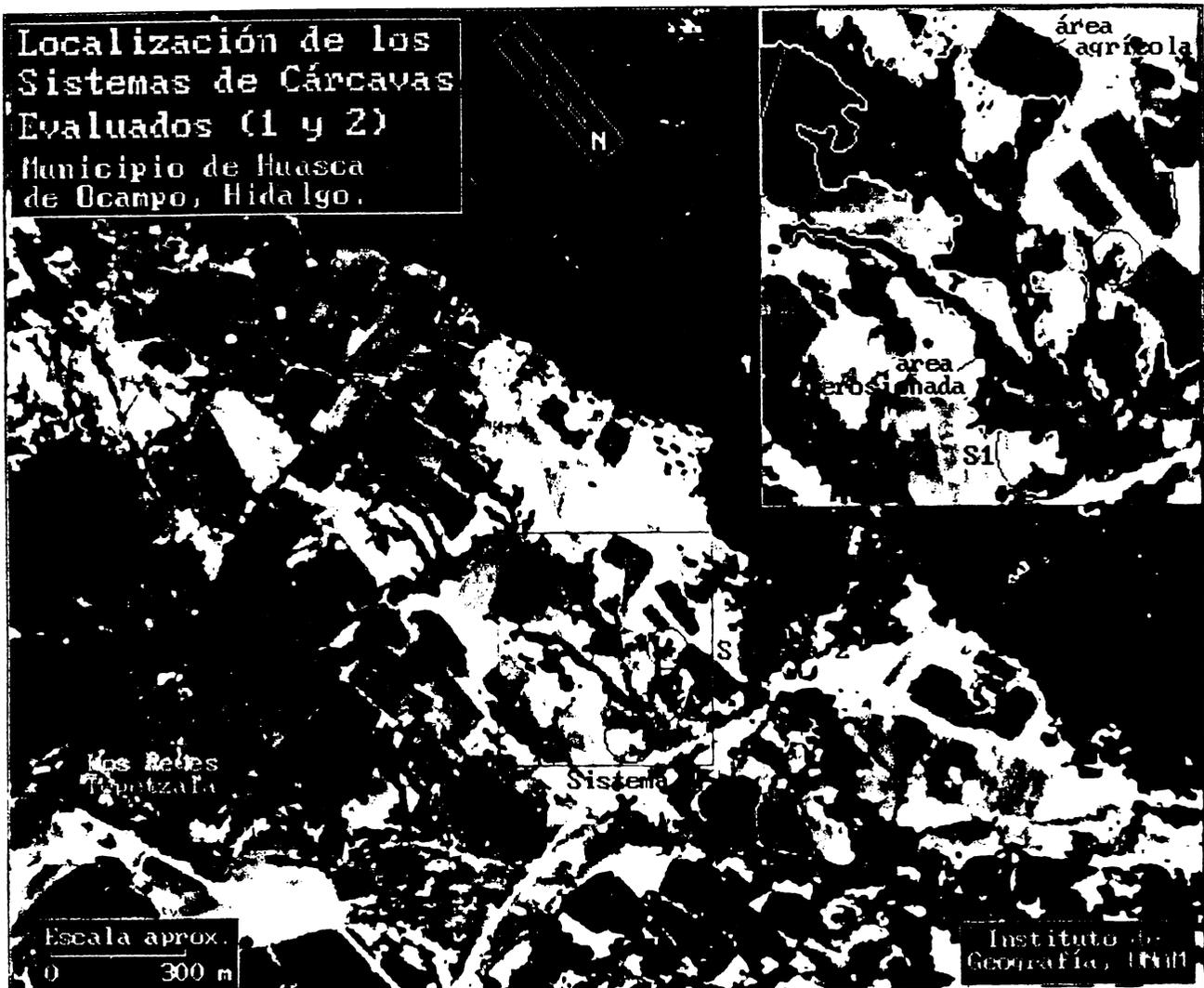


Figura 1.2. Localización específica del área en estudio. Sistemas de Cárcavas 1 y 2 (S1 y S2). En la porción inferior izquierda se ha marcado la localidad de los Reyes Tepetzala y en el recuadro se ha delimitado el "badland" o "barranquera" al cual corresponden los sistemas de cárcavas evaluados. También se han marcado algunas áreas agrícolas circundantes. Figura obtenida a partir de la edición en el SIG de una fotografía aérea pancromática, tomada en diciembre de 1981 a una escala original de 1:25,000, la cual fue digitizada mediante un barredor ("scanner").

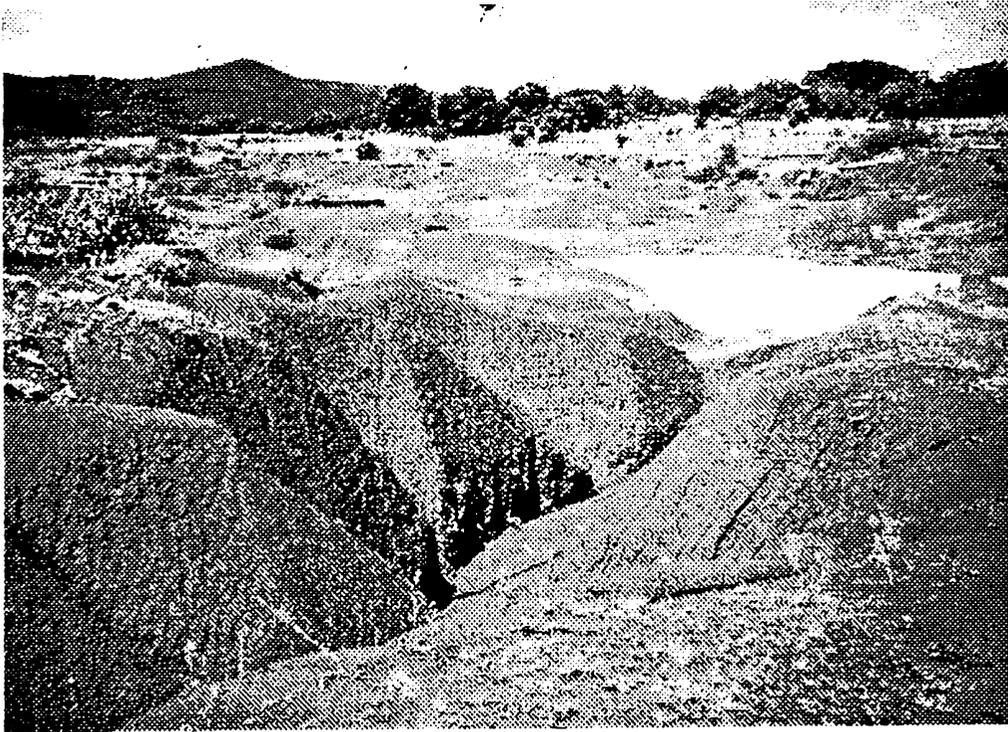


Foto 1.1. Se muestra la fase terminal del proceso de erosión acelerada de suelos, al fondo el nivel original del terreno y el volumen de suelo que ha sido erosionado. Evidentemente esta área no podrá seguir siendo utilizada para actividades agrícolas.

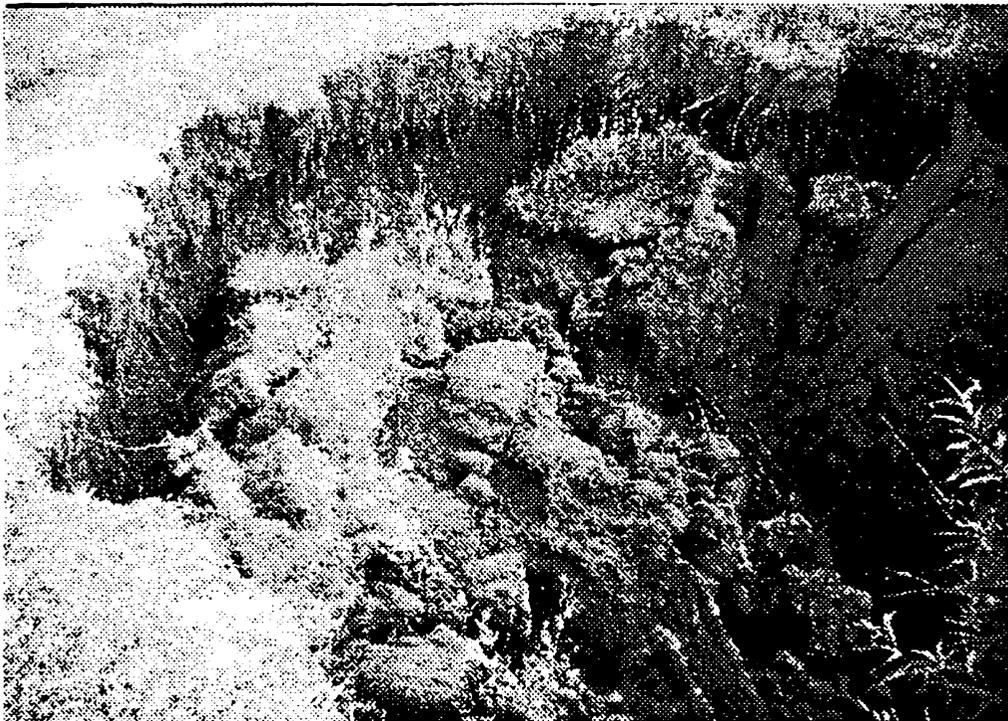


Foto 1.2. Se muestra la cabecera de la cárcava de uno de los sistemas evaluados. Puede notarse que los "paquetes" de suelo caen por procesos gravitacionales asociados a escorrenría superficial y subsuperficial, las raíces del pasto marcan el efecto de cascada que se forma al fluir el agua transportada por procesos de escurrimiento laminar. Nótese que existen unas pequeñas "cornisas" que se forman abajo de los primeros 25 cm del suelo. El ancho de la cárcava es de aproximadamente 4 m.

Lo que si es seguro es que no solamente están involucrados los fenómenos puramente hortonianos de hidrología de vertientes, que ocasionan flujos y erosión laminares, sino que también están involucrados normalmente flujos subsuperficiales que desencadenan procesos de remoción en masa en los escarpes; esto es, la caída de "paquetes" de suelo en las paredes de la cabecera y asentamientos del terreno, inmediatamente hacia arriba de la misma, causados por el transporte de partículas por el flujo subsuperficial (Palacio-Prieto, 1990:46, Bocco, 1991:397, Vázquez-Selem, 1992:55-65).

En Bocco (1991) se encuentra una revisión reciente y detallada de la literatura reportada acerca de los procesos y modelos que explican la erosión en cárcavas. En Vázquez-Selem (1992), se ha hecho una descripción precisa sobre los procesos involucrados en la formación inicial de las cárcavas y en el retroceso de sus cabeceras, para una área del municipio de Huasca.

De acuerdo a lo anterior, a las cárcavas se les ha considerado como resultado de los procesos más acelerados de erosión del suelo, lo cual repercute como se dijo anteriormente, en la degradación del medio ambiente natural y en la pérdida de los recursos.

En un estudio antecedente en el área evaluada, se aplicó una metodología para la determinación de áreas de erosión potencial en cárcavas, a partir de una caracterización de variables físicas y de uso del suelo de las áreas ya erosionadas, procesando la información en un SIG y definiendo finalmente las áreas con mayor potencialidad de presencia de procesos de desarrollo de cárcavas (Palacio-Prieto, 1990).

En el inventario de áreas erosionadas realizado por Palacio-Prieto (1990:53) se menciona que el 5% de los aproximadamente 300 km² que tiene de área total el municipio, son acarcavamientos, los cuales están asociados fuertemente a las siguientes variables físicas y de uso del suelo más frecuentes: Litología dominante: *Basalto* 75 %, Tipo de suelo: *Luvisoles* 86%, Uso del suelo: *Pastizales y agricultura de temporal* 88%, Intervalo de pendiente: *De 2-8% un 68%*. Los valores en porcentaje son con respecto al total del área erosionada (Palacio-Prieto, 1990).

Palacio-Prieto y Vázquez-Selem (1992) cuantificaron, a partir de mediciones continuas de producción de sedimentos, mediante canales parecidos a los empleados por Gerlach (1967:173), la cantidad de partículas removidas de los montículos-relictos (semejantes a los mostrados en la Foto 1.1), en áreas en donde el total del suelo ha sido completamente transportado por procesos de erosión acelerada de suelos ("*badland*").

Vázquez-Selem (1992:108) encontró, en una evaluación general de los suelos de una porción del municipio, que existe una concentración marcada de cárcavas en dos tipos de suelos principalmente: *Paleustalfs* *Tipicos* y *Haplustalfs* (USDA Soil Taxonomy System), caracterizados por arcillas finas del tipo kaolínico, desarrollados sobre piedemontes formados por flujos de lavas basálticas. El menciona que estos suelos "son comúnmente profundos, caracterizados por un perfil truncado hasta el nivel del horizonte B_t y cubiertos por material coluvial retrabajado".

Algunos de los resultados obtenidos y reportados en las citas referidas, serán considerados y relacionados con los resultados de esta tesis, en la parte correspondiente a discusión y consideraciones finales de este estudio de caso (sección 1.11).

1.5 METODOLOGÍA

La metodología empleada en este trabajo se apoya fundamentalmente en el uso de las tecnologías de la percepción remota o teledetección, la videografía como un caso particular de la anterior, y los sistemas de información geográfica, con la finalidad específica de cuantificar la superficie de avance de la erosión en cárcavas.

Este trabajo se basa en el procesamiento de imágenes en formato digital, obtenidas por una cámara convencional de video, sujeta a un globo aerostático de fabricación "casera". El método que aquí se propone es una alternativa en estudios de erosión de suelos y, sobre todo, para estudios de riesgo potencial y de predicción del avance del fenómeno. En la Figura 1.3 se muestra un esquema de la metodología empleada en este trabajo. Los siguientes párrafos corresponden a un resumen de la metodología empleada; en páginas posteriores se hace una descripción detallada de los procedimientos y resultados obtenidos.

-Se utilizó una cámara comercial de video (*Sony Handycam CCD-TR55*, $f=11-66$ mm, sensibilidad a la luz de $0.4-0.7 \mu\text{m}$, formato de cinta de 8 mm) en áreas previamente seleccionadas, consideradas como representativas del proceso de erosión acelerada.

-Se diseñó y construyó un globo aerostático con bolsas de plástico infladas con helio y con suficiente potencia de ascenso para llevar la cámara de video. El globo fue controlado desde tierra utilizando cordones de nylon.

-Las imágenes de las áreas seleccionadas fueron obtenidas desde muy diversas alturas, para registrar los mayores detalles desde 13 hasta 21 m en el Sistema 1 y para las vistas de conjunto del mismo sistema, entre 57 m hasta los 198 m sobre el nivel del terreno. El área cubierta osciló, dependiendo de la altura desde 31 m^2 volando a 13.5 m de altura, hasta un máximo de 6570 m^2 volando a 198 m.

-Previamente a la toma de las imágenes, se realizó trabajo de campo topográfico, con el fin de establecer y medir puntos de control en el terreno, para obtener así un sistema de coordenadas convencionales. Se estableció una red de puntos de control topográfico, señalándolos de manera muy clara en el momento de las tomas. Los puntos fueron referenciados en un sistema arbitrario de coordenadas y las unidades utilizadas en dicho sistema fueron asignadas en centímetros.

-Como los cambios más drásticos en el avance de la erosión del suelo se presentan sobre todo al inicio y durante la temporada de lluvias, fue necesario realizar tomas consecutivas del terreno en ese lapso.

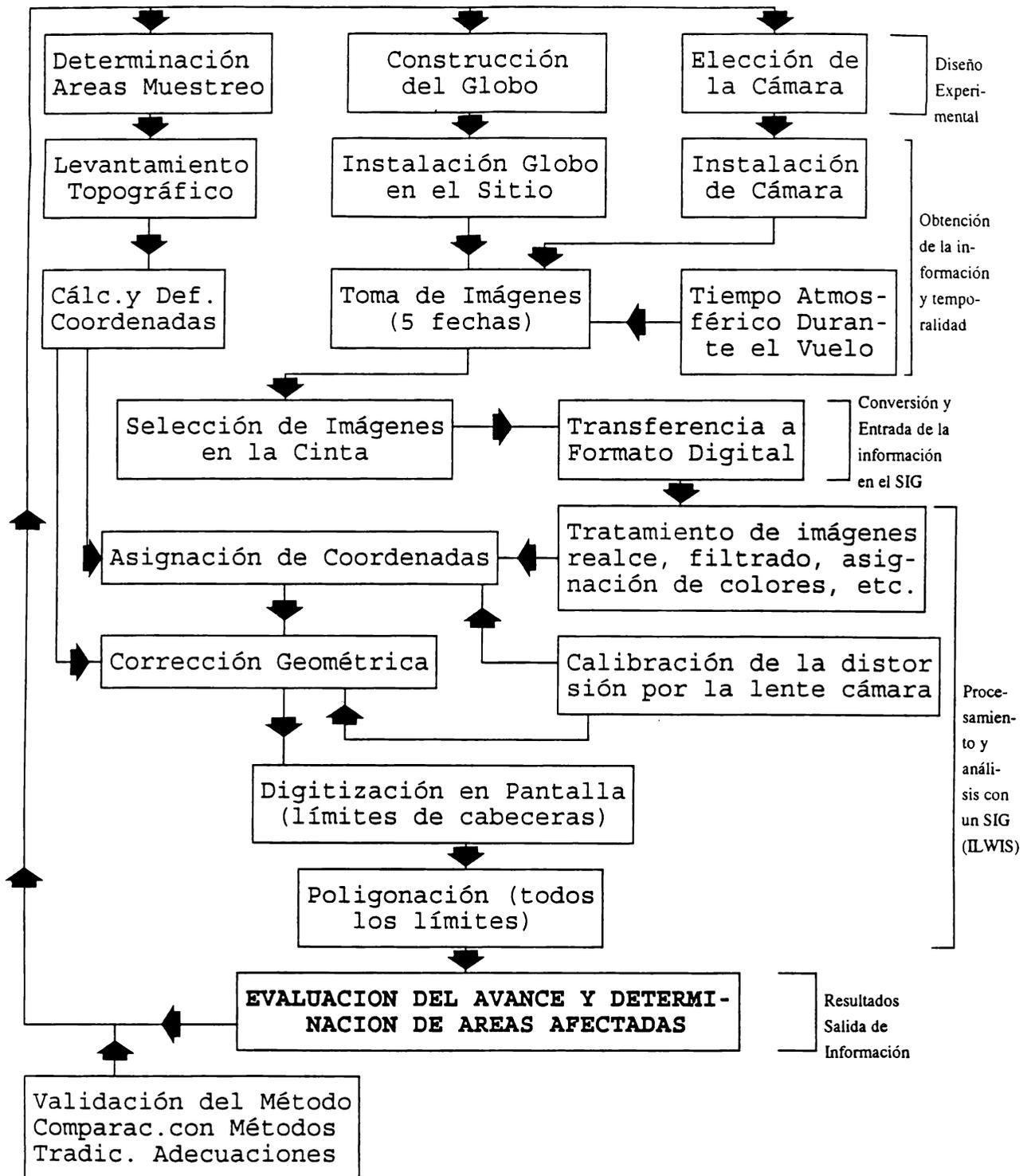
-Se obtuvieron imágenes con cinco fechas diferentes (junio, agosto y diciembre de 1991, julio y diciembre de 1992) para el Sistema de cárcavas número 1 y tres fechas (agosto y diciembre de 1991, y julio de 1992) para el Sistema de cárcavas número 2, previas, durante y posteriores a la temporada de lluvias, con el fin de comparar información multitemporal y así establecer el crecimiento de los rasgos de erosión acelerada (cabeceras de cárcavas).

-Las imágenes de video fueron digitizadas mediante una tarjeta ("*Oculus*") de transferencia de video a computadora, inicialmente, con una resolución máxima de 320 columnas por 200 líneas, posteriormente, con resolución de 640 columnas por 480 líneas de celdas o "*pixeles*". En este último caso se usó la tarjeta Targa 16 Plus.

-El procesamiento de la información digital, realizado en el SIG, consistió en la georreferenciación de las imágenes, a partir de las coordenadas calculadas de los puntos de control establecidos en el levantamiento topográfico previo.

-Para llevar a cabo las mediciones en las imágenes digitizadas se realizaron correcciones geométricas, utilizando las funciones disponibles en ILWIS considerando hasta ocho puntos de control (ver tablas en el Apéndice A.4), lo cual permitió minimizar y estandarizar los errores causados por el movimiento del globo y los propios de la óptica de la imagen (ver ILWIS, 1992 y Valenzuela, 1988).

Figura 1.3. Esquema de la metodología empleada para la obtención, y procesamiento de las imágenes de video en la definición del avance de la erosión en las cabeceras de cárcavas.



-Otras técnicas convencionales de procesamiento digital fueron aplicadas a las imágenes (mejoramiento de contraste, filtrados, asignación de colores, etc.). La definición del avance de la erosión en cárcavas en los ejemplos seleccionados, por último, fue establecida por la sobreposición de resultados obtenidos para cada imagen.

-Los errores se han evaluado al comparar las distancias "reales" obtenidas a partir de las coordenadas (calculadas y compensadas en gabinete) de los puntos de control establecidos durante el trabajo de campo topográfico, con respecto a las distancias calculadas obtenidas a partir de las imágenes corregidas geoméricamente.

-Mediante el programa de digitización en pantalla ("*screen digitizing*") se trazaron los límites de una misma cabecera de cárcava en las imágenes secuenciales, estos segmentos se utilizaron para, mediante un proceso de "*poligonación*" o de creación de polígonos, obtener el área de avance de la erosión para el lapso considerado, con ello se obtuvo el valor de la superficie erosionada y las longitudes máximas de avance en las diferentes porciones de la cabecera.

Tomando como base el esquema de la Figura 1.3, a continuación se hará una descripción detallada de cada uno de los aspectos que se han anotado en él y además una explicación de la manera en que fueron solucionados dentro de este trabajo. Al final de esta parte de la tesis (Estudio de caso 1) se han incluido los resultados obtenidos, así como una serie de conclusiones derivadas del análisis realizado.

1.6 FASE DE DISEÑO EXPERIMENTAL

1.6.1 Determinación de áreas de muestreo.

Un paso inicial importante dentro de la aplicación de la metodología mostrada, fue el de la selección de las áreas a monitorear (sistemas de cárcavas 1 y 2) con base en los siguientes criterios:

-Estas áreas son representativas de los procesos de erosión acelerada de suelos o en cárcavas, al igual que algunas otras áreas del Sistema Volcánico Transversal (Mazamitla, Temascaltepec, Calpulalpan, Tlalpujahuá, El Oro, Taxco, Pátzcuaro, Xicotepéc, etc.).

-Para el caso del municipio de Huasca de Ocampo, estado de Hidalgo, se ha cuantificado en cerca de un 5% su superficie con presencia de cárcavas (Palacio-Prieto, 1990:53), esto da por resultado que haya una pérdida constante de áreas de cultivo y sus efectos colaterales (azolve de presas, etc.), lo que repercute en la degradación del ambiente y en la pérdida constante de recursos naturales. Esta es una razón suficiente, para evaluar cuantitativamente, la magnitud del avance a partir de un muestreo sistemático, representativo y multitemporal de los procesos de avance de la pérdida de áreas de suelo por erosión.

-Desde hace algunos años en el Instituto de Geografía de la UNAM, se ha llevado a cabo un programa institucional de investigación titulado "*Destrucción de Tierras*", que incluye el proyecto "*Destrucción de Tierras en el municipio de Huasca de Ocampo, Hidalgo*". Resultado de ello ha sido una serie de trabajos de investigación y de realización de tesis que han permitido generar y conocer mayor cantidad de información acerca del fenómeno estudiado, estos estudios han aportado información sobre los procesos erosivos, inventarios de áreas erosionadas, propiedades de los suelos, características del uso del suelo y agua (ver Romero-Terán, 1989; Palacio-Prieto y Vázquez-Selem, 1990; Palacio-Prieto, 1990; Vázquez-Selem, 1992; etc.).

-El tipo de suelo existente (arcilloso y profundo) dominante en las áreas erosionadas de Huasca y localizados preferentemente en laderas de baja inclinación, coincide con un tipo de suelo en el

cual, en muchos sitios en el país se han detectado rasgos de erosión acelerada, particularmente en el Sistema Volcánico Transversal (Bocco, 1986:57-58 y Palacio-Prieto, 1990:49). Este estudio por lo tanto es una contribución a la caracterización de la dinámica erosiva en esas áreas, en términos de avance longitudinal y de pérdidas de superficies de suelo.

-Los tipos de usos del suelo que se practican en el municipio, corresponden a los que tradicionalmente se realizan en la mayor parte de las porciones de suelos de origen volcánico reciente, en la porción central de México, particularmente en el Sistema Volcánico Transversal (agricultura de temporal, pastizales inducidos, parcelas no cultivadas).

-Agregando a lo anterior, existe una razón de carácter práctico que influyó en la decisión de elegir las áreas específicas de muestreo, ésta es que, los sistemas de cárcavas 1 y 2 (Figura 1.2), son accesibles desde los caminos de terracería, incluso se puede tener acceso directo a la cabecera de la cárcava con el vehículo. En el caso del Sistema 2, esto facilitó el trabajo para realizar los vuelos y las medidas en el campo.

1.6.2 Diseño y construcción del globo aerostático.

El globo aerostático fue construido con bolsas de plástico selladas con cinta adhesiva e infladas con gas helio, controlado manualmente desde tierra, mediante cuatro tirantes de hilo plástico del tipo usado comúnmente en actividades de pesca deportiva (ver Fotos 1.3 y 1.4).

Una de las ideas originales que se plantearon al iniciar este trabajo, fue la de construir un globo aerostático de manufactura "*doméstica*" o "*casera*", es decir que fuese fácilmente construible con materiales accesibles y baratos, además que tuviese algunas características que lo hiciesen utilizable en diversas circunstancias y no solamente para los fines de evaluación de erosión de suelos.

Considerando las ideas iniciales mencionadas acerca del diseño, se pensó en la posibilidad de utilizar bolsas de plástico que pudiesen contener un volumen considerable de gas helio para poder realizar la ascensión con la cámara de video.

La capacidad volumétrica del globo es aproximadamente de 3 m³, lo cual permitió elevar un peso total de poco más de dos kilogramos (el peso de la cámara es de aproximadamente 1 kg excluyendo la batería y el videocasete). En un principio se utilizaron bolsas de polietileno de dimensiones mayores (3 por 1.5 m) a las empleadas posteriormente, a las cuales se les adhirió en los cuatro extremos y en las partes medias e intermedias, cinta adhesiva. Esto se hizo pensando en que, la presión del gas helio en el plástico de las bolsas pudiese causar tensión suficiente para dañarlas y romperlas.

Esto no sucedió así, sino que en cambio el volumen extra de la cinta y de las bolsas del tamaño mencionado, provocaba un mayor peso y por tanto un mayor gasto del gas, además de tener una mayor inestabilidad en relación a la intensidad de los vientos. Para corregir esto se optó por usar bolsas de tamaño más pequeño (2.5 por 1.3 m) y sin recubrimiento de cinta adhesiva, a excepción del extremo inferior de las bolsas, particularmente en la parte del orificio que se dejaba para la entrada del gas.

Inicialmente se probó la ascensión del globo con solamente dos bolsas, lo que se observó, fue que la altura máxima obtenida en el vuelo no era la suficiente para los fines perseguidos. Así que se optó por usar una tercer bolsa, la cual permitió agregar aproximadamente 1 m³ de helio. En total las tres bolsas suman un poco más de 3 m³ (ver Fotos 1.3 y 1.4).

Con esto se lograron alturas máximas de vuelo de alrededor de 200 m, aunque es importante decir

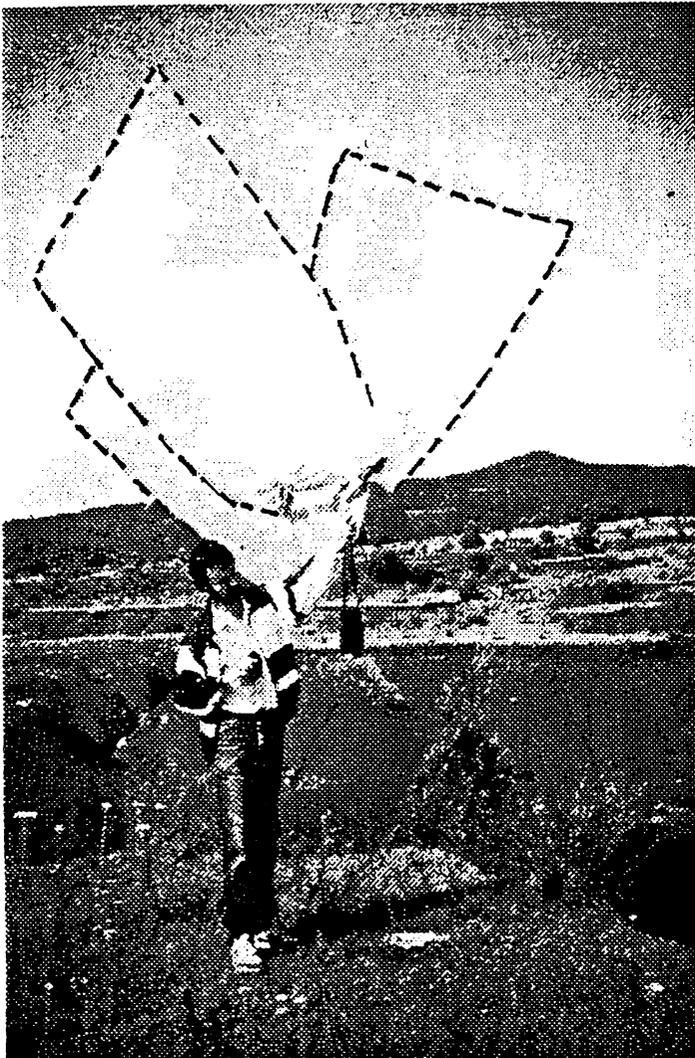


Foto 1.3. Se muestra el globo utilizado y la forma de sujetar la cámara de video. La verticalidad del eje de la cámara se consiguió colgándola con su correa, sobre el "puente" de cinta de tela que une a las tres bolsas. Nótese el volumen conseguido al inflar con helio las bolsas de plástico.



Foto 1.4. Probando el buen funcionamiento de la cámara antes de la ascensión del globo, se revisa que se registren adecuadamente las imágenes, se deja fija manualmente la distancia focal de toma (11 mm para estos vuelos) y su velocidad de "exposición" (1/250 de segundo).



Foto 1.5 Se muestra parte de las actividades realizadas durante el trabajo de campo topográfico, particularmente aquí el proceso de selección y establecimiento de los puntos de control.

que con esa estructura de tres bolsas se pueden lograr alturas mucho mayores de las conseguidas en este trabajo.

Las únicas limitantes, en este sentido, son la longitud de los cordones de nylon utilizados para el control del globo desde tierra, y por supuesto, las condiciones de viento presentes durante el tiempo del vuelo.

Un problema que se presentó durante la realización de los cinco vuelos para cubrir las cinco fechas del monitoreo, asimismo en los vuelos de prueba, fue la reducción de la capacidad de carga del globo utilizado, conforme pasaba el tiempo de vuelo. Esto se debió al escape del gas por los pequeños orificios que se formaban, a causa del no cerrado hermético y al uso constante de las bolsas del globo. La pérdida de helio y la entrada de aire se presentaba continuamente, aunque en cantidades pequeñas, lo que ocasionaba que se fuese reduciendo su fuerza de ascensión.

En relación a esto es importante decir que para lapsos de vuelo muy largos, o para varios días continuos de vuelo en la misma zona y con el mismo gas, es necesario cuidar un sellado hermético, utilizar bolsas nuevas o buscar algún material que no sufra el deterioro mencionado.

El gas helio utilizado para la ascensión del globo aerostático tiene un costo aproximado de 25 USD por m³ (precio en 1992). La disponibilidad de compra de este gas puede ser un problema si el sitio de estudio se encuentra alejado de los centros urbanos. Normalmente en las ciudades medias en México, existen compañías distribuidoras de gases industriales, en las cuales es donde comúnmente se puede adquirir.

En la literatura especializada se han reportado datos acerca de las características del gas helio en relación a su uso en globos aerostáticos. Mims III (1990:94) menciona que al nivel del mar ese gas puede elevar alrededor de 1.1 kg por m³. Este mismo autor no recomienda el uso de otros gases ligeros, como el hidrógeno, debido a que por su alta flamabilidad pueden causar explosiones.

En cambio Whittlesey (1967:68) que realizó sus vuelos con gas hidrógeno, considera que una alternativa, por su costo, es el uso de ese gas. El recomienda generar el hidrógeno en el sitio del vuelo ya que es más práctico y hay menos riesgo, que si se comprime y transporta en cilindros.

Myers (1978:146) describe los problemas que tuvo Guy (1932) cuando realizó sus vuelos usando hidrógeno. Menciona que debido a los orificios del globo y con el paso del tiempo de vuelo, se producían mezclas con el aire lo cual ocasionaba mayores proporciones de explosividad, esto sucedía particularmente en el proceso de reinflado del globo a causa de las chispas causadas por la energía estática de los operadores.

1.6.3 Selección y características de la cámara de video utilizada.

El principal criterio para la selección de la cámara utilizada fue el peso de la misma, tendría que ser una de las más ligeras para así lograr elevarla a alturas considerables utilizando menor cantidad de gas helio en el globo.

La cámara que se utilizó fue una convencional de video del tipo *Sony Handycam CCD-TR55*, con límites mínimo y máximo de distancia focal entre 11 y 66 mm respectivamente, con longitudes de onda de sensibilidad a la luz entre 0.4 y 0.7 micrómetros y con un formato de cinta de 8 mm. En la Tabla 1.2 se presentan algunas de las principales especificaciones técnicas de la cámara de video utilizada.

Como se marca en la tabla mencionada, el dispositivo de obtención de las imágenes en la cámara

de video es el *CCD* (*Charge Coupled Device* o dispositivo de transferencia de carga). Este videodetector está construido por una gran cantidad de elementos fotodetectores o sensores activos (270,000 para la cámara utilizada), en un microcircuito o "*chip*" de 1/2 de pulgada de distancia medida en diagonal. La tecnología de los CCD se basa, en la capacidad extraordinaria de un dispositivo semiconductor, de transferir los fotones de luz que caen sobre su superficie en valores de flujo de electrones (Almelio, 1974; citado por Burrough, 1989:62).

Cada uno de los fotodetectores mencionados tiene la capacidad de convertir la cantidad de luz recibida en impulsos eléctricos, de intensidades proporcionales a dicha cantidad de luz, esto para cada uno de los tres colores primarios. De acuerdo a esto y debido a que poseen pequeños filtros en cada fotodetector para captar y cuantificar los valores de intensidad de cada "*filtro*" por color primario, es posible generar de esta manera una señal de video "*compuesto*" estándar.

Como parámetro de comparación en relación a los valores límite mencionados de distancias focales de la cámara (11-66 mm), se ha estimado que dichos valores para una cámara fotográfica de formato de 35 mm (36 mm de largo por 24 mm de ancho) corresponderían de 58.5 a 351 mm respectivamente (Sony Corporation, 1989:71) y hablando en términos de ángulo de cubrimiento de campo, correspondería a un haz de 25.3° para el lado más largo contra 19.5° para el lado más corto.

Este modelo de cámara pesa un poco más de un kilogramo, utilizando una batería de 45 minutos de duración y posee una serie de velocidades de obturación de toma o "*tiempo de exposición*" de las imágenes, que van desde 1/60 de segundo (*tiempo normal de exposición*) hasta 1/4000 de segundo (Sony, Corporation, 1989:65-67).

La velocidad que se usó en este trabajo fue de 1/250 de segundo, se optó por ella para evitar durante el movimiento de la cámara los "*barridos*" en las imágenes comunes al usar velocidades "*lentas*" ("*imagen movida*" al momento de "*congelarla*", esto durante el proceso de la transferencia a formato digital hacia la computadora), y además para equilibrar las posibilidades de uso del diafragma, en la recepción de luz suficiente para así tener imágenes de buena calidad.

El costo de la cámara para el modelo mencionado es, en la actualidad, menor a los 600 USD, aunque se pueden encontrar modelos mucho más complejos, con tecnología más desarrollada, los cuales pueden alcanzar costos de varios miles de dólares.

El funcionamiento de la cámara durante el vuelo, se realizaba automáticamente, es decir antes de la ascensión se dejaba encendida registrando imágenes y se le asignaba una distancia focal y una longitud de enfoque fijas (11 mm y al infinito, respectivamente, ver Foto 1.4).

Para tener una idea de la superficie de terreno registrada a diferentes alturas de vuelo (utilizando la distancia focal de 11 mm) y las dimensiones resultantes de los pixeles de las imágenes ya digitizadas, se muestra la Tabla 1.3. En ella se observa que, conforme se aumenta la altura de vuelo el área de cubrimiento es mayor, y por supuesto, las dimensiones de los pixeles crecen proporcionalmente teniendo por tanto menor resolución espacial. Las columnas dos y tres de dicha tabla se refieren a las dimensiones en metros del cubrimiento del terreno en un rectángulo de tales longitudes (largo y ancho, respectivamente).

Para realizar la tabla anterior fue necesario aplicar un procedimiento empírico que permitiera conocer los ángulos de cubrimiento de campo de la cámara de video empleada. Este procedimiento consistió en medir en el terreno, con cinta de acero, la longitud que abarcaba el rectángulo de cobertura de campo de la cámara (cuadro de registro), tanto a lo largo como a lo ancho, a diversas distancias de la cámara. Con estos datos se obtuvieron dos ángulos promedio que sirvieron como constante para obtener los datos de la Tabla 1.3. El procedimiento completo y los ángulos de cubrimiento de campo resultantes, se han incluido en el Apéndice A.2.

Tabla 1.2 Especificaciones técnicas de la cámara de video Sony Handycam CCD-TR55 utilizada para la obtención de las imágenes multitemporales de los sistemas de cárcavas.

Sistema videograbador	Helicoidal (4 cabezas giratorias)
Sensor de imágenes	CCD (Dispositivo de transferencia de carga) 1/2" (270,000 pixeles).
Vidoseñal	Color NTSC, norma estándar de la EIA (525 líneas).
Objetivo	Zoom de 6 aumentos (f=11-66 mm)
Sist. de enfoque automático	TTL
Iluminación mínima	4 lux
Gama de iluminación	4-100,000 lux
Corrección de abertura	Automática
Tamaño y veloc. de la cinta	8 mm, 1.43 cm/seg
Dimensiones de la cámara	106 x 107 x 176 mm (an/al/prf)
Peso de la cámara	Aprox.790 gr sin batería y casete

FUENTE: SONY CORPORATION, 1989:144.

Tabla 1.3. Areas de cubrimiento en relación a la altura de vuelo para una cámara de video de formato de cinta de 8 mm y con una distancia focal de 11 mm.

Altura (m)	Largo (m)	Ancho (m)	Area de Cobertura (m ²)	Pixel* (m)	Pixel** (m)
25	11.8	9.0	105.4	0.018	0.037
50	23.5	17.9	421.7	0.037	0.074
75	35.3	26.9	948.7	0.055	0.110
100	47.1	35.9	1686.7	0.074	0.147
200	94.1	71.7	6746.3	0.147	0.294
500	235.2	179.3	42167.3	0.368	0.735
1000	470.5	358.5	168664.6	0.735	1.470
2000	940.9	717.0	674675.0	1.470	2.940
3000	1411.4	1075.5	1517995.6	2.205	4.411
5000	2352.3	1792.6	4216680.3	3.675	7.351

CAMARA UTILIZADA: SONY HANDYCAM CCD-TR55 (f=11-66 mm). DISTANCIA FOCAL EMPLEADA=11 mm. *TAMAÑO DE PIXEL EN m PARA IMAGENES DIGITIZADAS CON UNA RESOLUCION DE 640 COLUMNAS POR 480 FILAS. **TAMAÑO DE PIXEL EN m PARA IMAGENES DIGITIZADAS CON UNA RESOLUCION DE 320 COLUMNAS POR 240 FILAS.

1.7 FASE DE OBTENCION DE LA INFORMACION.

1.7.1 Realización del levantamiento topográfico y el cálculo de coordenadas de los puntos de control utilizados para las imágenes.

Previamente a la toma de las imágenes se realizó un levantamiento topográfico, con el fin de definir puntos de control en el terreno, para obtener así un sistema ortogonal centimétrico de coordenadas convencionales, que permitiera georreferenciar a las imágenes obtenidas, y éstas fuesen comparables geoméricamente aunque hubiesen sido registradas en diferentes fechas y a diferentes escalas (ver Foto 1.5). El procedimiento que se siguió para la obtención de las coordenadas de los puntos de control, que aparecen en las imágenes de las cinco fechas (Sistema 1) y tres fechas (Sistema 2) se describe en los siguientes párrafos:

Después de haber elegido los dos sistemas de cárcavas por monitorear (Sistemas 1 y 2, S1 y S2 de la Figura 1.2) se hizo un recorrido exploratorio, para definir por un lado, los sitios más adecuados para ubicar los puntos de control, que permitieran generar una red de marcas fijas en el terreno. Por otro lado, también sirvió para estimar la cantidad de puntos de control auxiliares que se requerirían en cada una de las cabeceras de cárcavas de los dos sistemas mencionados (ver Foto 1.5).

Para el Sistema 1 se definieron cinco cabeceras de cárcavas que podrían ser monitoreadas. A cada una de ellas le correspondió una cantidad de entre cuatro a ocho puntos de control auxiliares (ver Tabla 1.4 y Figura 1.4). En la Figura 1.35e, en la sección 1.11 al final de este estudio de caso, se puede observar una imagen registrada a casi 200 m de altura, de todo el Sistema 1 y la mayor parte de los puntos de control utilizados. Para la red principal de puntos en este sistema, se situaron seis estacas de madera con un clavo fijo en el centro. Para la red complementaria (puntos auxiliares) se usaron clavos de 15 cm de longitud, enterrados en el suelo.

Para el Sistema 2 se definieron cuatro puntos de control principales, señalados con estacas de madera, como se describió anteriormente y 17 puntos de control auxiliares (ver Tabla 1.4 y Figura 1.5). En la Figura 1.24, en la sección 1.10, se puede observar una imagen registrada a 94 m de altura, de todo el Sistema 2 y con casi todos los puntos de control utilizados (y sus nombres), también se marca el área de la cabecera que fue evaluada para las tres fechas del análisis en este sistema.

El levantamiento topográfico consistió en dos partes:

1. Obtención del *control planimétrico*, coordenadas X e Y (en cm) de los puntos de control y
2. Obtención del *control altimétrico*, valores de alturas en metros de los puntos de control.

En el primer caso se utilizó un método de levantamiento conocido como "*trilateración*". Consiste en la medición con cinta de acero de las distancias lineales generadas por los vértices y puntos de control situados. Es decir, se miden los tres lados de todos los triángulos, formados éstos por tres vértices adyacentes y posteriormente se calculan los tres ángulos interiores (Ballesteros-Tena, 1990:43; Schmidt y Rayner, 1978:179-182). Debido a que se calculan todos los ángulos interiores, de los triángulos generados, es posible definir un valor angular promedio, para cada vértice de una poligonal que se forma, cuando se consideran todos los puntos de control establecidos (ver Figura 1.6)

Además de medir las distancias lineales de todos los lados de los triángulos formados, también se midieron, mediante la brújula tipo *Brunton*, los rumbos magnéticos de algunos de los lados, formados por algunos de los principales puntos de control, esto con la finalidad de tener una referencia de orientación con el Norte magnético, para así ubicar adecuadamente todos los puntos

Tabla 1.4 Valores de alturas relativas (sistema de referencia arbitrario) para los puntos de control topográfico utilizados en los sistemas de cárcavas 1 y 2. Ver la posición de los vértices en las Figuras 1.4 y 1.5.

Sistema 1		Sistema 2	
Vértice	Altura (m)	Vértice	Altura (m)
I	1.397	I*	1.000
1	1.000	a	0.902
2	1.123	b	1.047
3	1.275	c	1.127
4	1.313	d	1.210
5	1.248	e	1.393
6	1.039	f	1.474
II	2.525	II	1.584
A	2.260	g	1.576
B	2.377	h	1.499
D	2.435	i	1.374
E	2.148	i'	1.206
III	2.240	III	1.251
1	2.274	j	1.079
2	2.230	k	1.015
3	2.035	l	1.019
4	1.897	m	0.999
IV	1.040	IV	0.999
A	1.720	n	0.821
B	1.451	o	0.811
C	1.225		
E	1.072		
F	1.060		
G	1.140		
V	5.563		
A	4.463		
B	5.053		
C	5.494		
E	5.401		
F	5.081		
G	4.847		
VI	2.933		

*LOS VERTICES SEÑALADOS CON NUMERO ROMANO CORRESPONDEN A ESTACAS DE MADERA CON CLAVO INCRUSTADO EN EL CENTRO (VERTICE PRINCIPAL), EL RESTO CORRESPONDE A MARCA DEFINIDA CON CLAVO INTRODUCIDO EN EL SUELO (VERTICE AUXILIAR).

PUNTOS DE CONTROL LEVANTAM.TOPOGRAFICO
SISTEMA DE CARCAVAS 1, HUASCA, HGO.

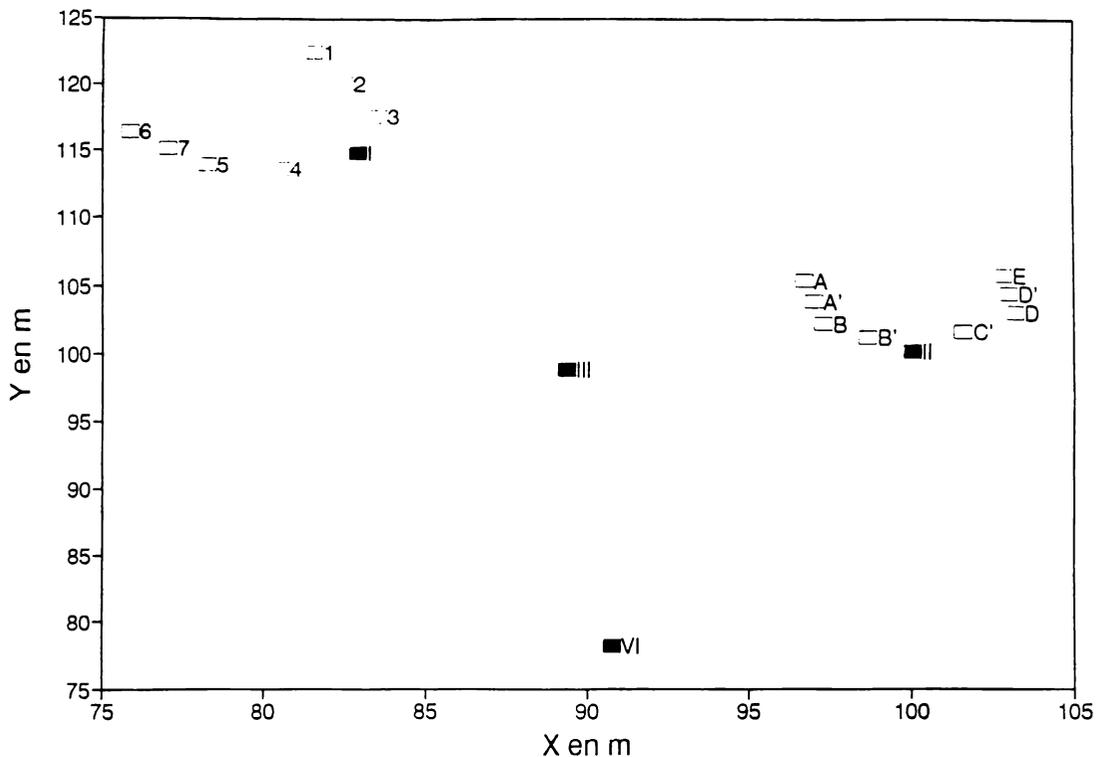


Figura 1.4 Localización de los puntos de control topográfico utilizados para el Sistema de Cárcavas 1. Puntos principales (cuadros negros) y auxiliares (cuadros blancos). Véase la lista completa de tales puntos de control y sus alturas relativas en la Tabla 1.4.

PUNTOS DE CONTROL LEVANTAM.TOPOGRAFICO
SISTEMA DE CARCAVAS 2, HUASCA, HGO.

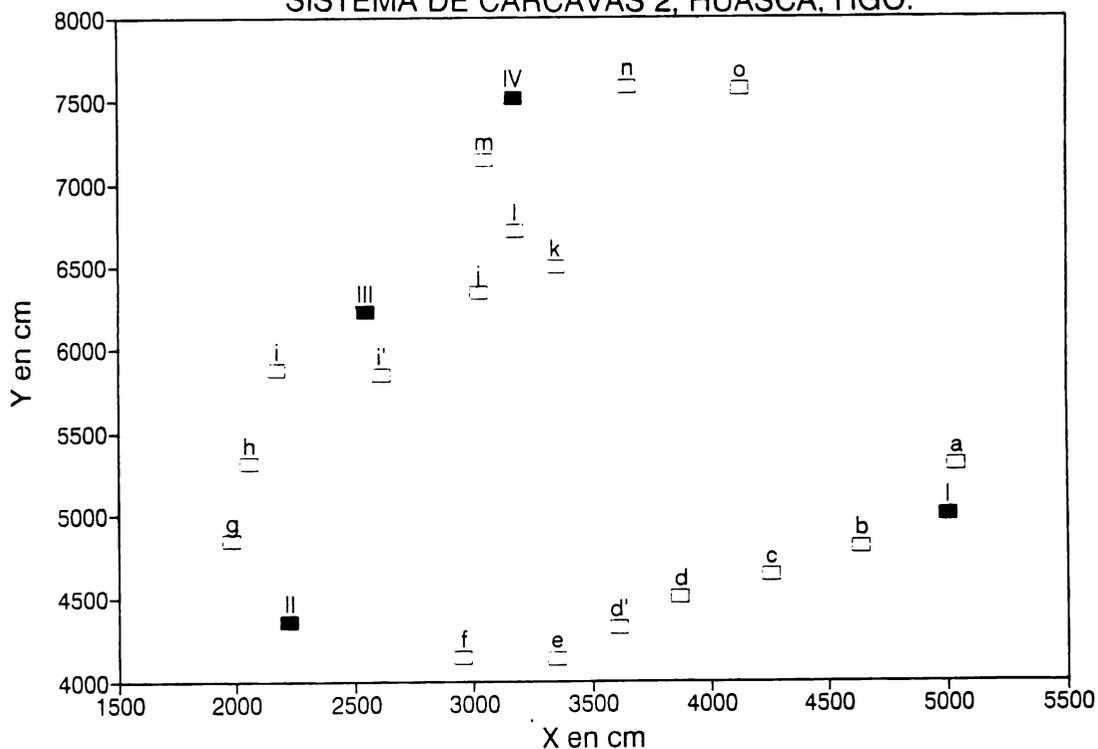


Figura 1.5 Localización de los puntos de control topográfico utilizados para el Sistema de Cárcavas 2. Puntos principales (cuadros negros) y auxiliares (cuadros blancos). Véase la lista completa de tales puntos de control y sus alturas relativas en la Tabla 1.4.

PUNTOS DE CONTROL LEVANTAM. TOPOGRAFICO
CARCAVA II DEL SISTEMA 1, HUASCA, HGO.

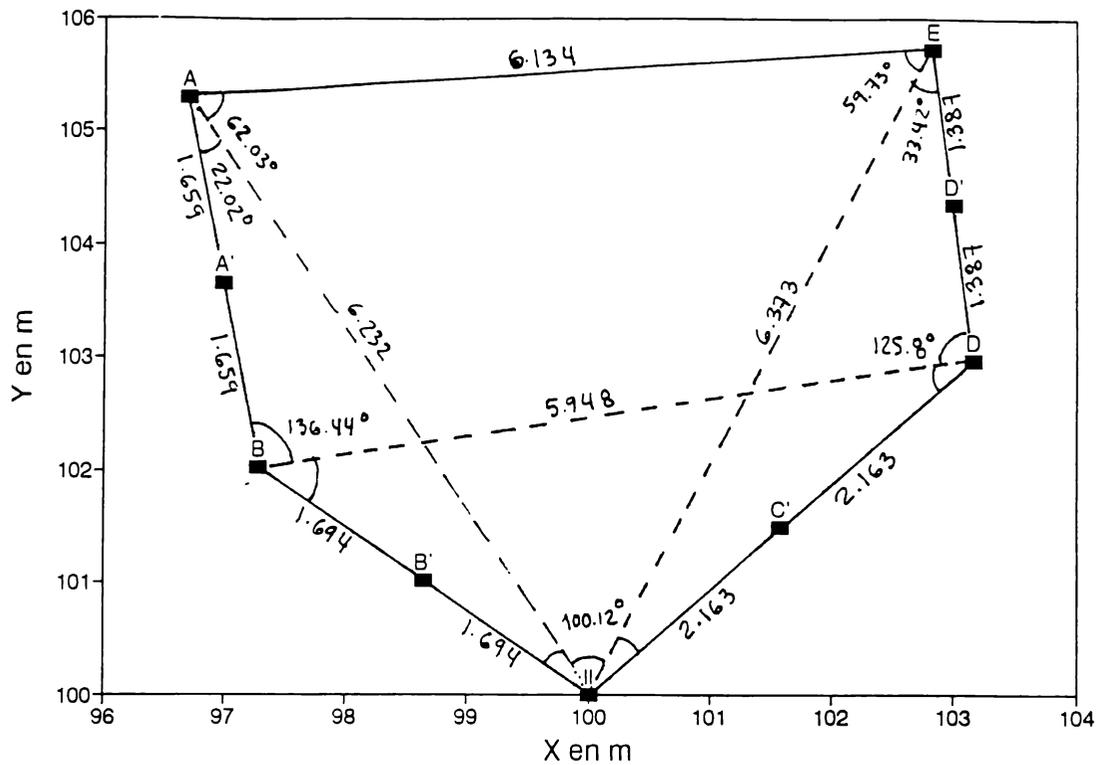


Figura 1.6 Obtención de los valores de los ángulos interiores, de los triángulos generados por tres vértices adyacentes (puntos de control topográfico). Las distancias de los tres lados de los triángulos formados, fueron medidas en campo para aplicar el método de "Trilateración".

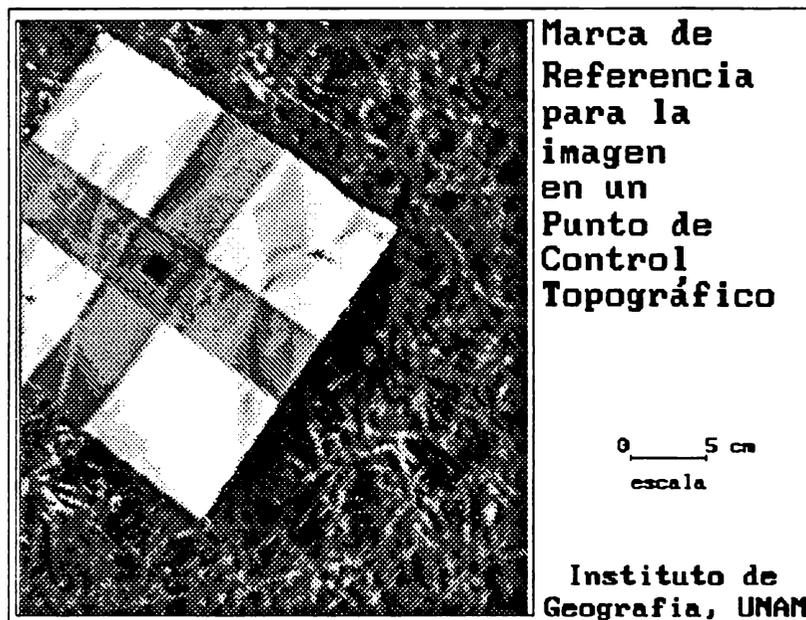


Figura 1.7. Marca de referencia para la imagen formada por un cuadrado de cartón blanco, señalando con una cruz de cinta adhesiva el centro del cuadrado. La perforación pequeña en el centro está justamente sobre la cabeza del clavo del punto de control topográfico. Imagen de video digitizada, editada en un SIG e impresa con impresora láser.

de control, en relación al sistema de cárcavas en su conjunto. Estos rumbos magnéticos además sirvieron, para tener un valor de azimut de partida, necesario para calcular en la computadora, las coordenadas de los puntos de control topográfico, este cálculo se explica más ampliamente en los siguientes párrafos.

Los valores de los ángulos interiores de cada uno de los triángulos fueron calculados con un programa muy simple, realizado por el autor de esta tesis, en lenguaje de programación Basic para este fin específico. Se corrió el programa y se procesaron los datos en la versión *Turbo Basic* del mismo lenguaje. El programa completo se ha incluido en el Apéndice A.3 Parte 2.

Para la obtención de las características altimétricas de los puntos de control se realizó una nivelación de tipo "*diferencial*" con nivel montado (en tripié, marca Zeiss), esto se hizo para caracterizar, los desniveles y las elevaciones, de cada uno de los puntos ubicados de control topográfico. Lo anterior sirvió para obtener las componentes horizontales de las longitudes, las cuales fueron medidas originalmente con la cinta sobre el terreno, de tal manera que se obtenían sus componentes inclinadas. Una tabla de valores de las cotas en un sistema de referencia arbitrario (alturas relativas) para cada punto de control, se ha anexado en la Tabla 1.4.

Como se puede ver en dicha tabla, los valores de alturas (sistema arbitrario de coordenadas verticales) entre los puntos de control establecidos, para los dos sistemas, no presentan desniveles marcados. Por ejemplo el desnivel máximo entre los puntos de control de la cárcava II del sistema 1 es de 38 cm (entre *II* y *E*) en una distancia de 6.4 m. Esta cárcava es la que se describe en los resultados finales de la evaluación del avance de la erosión en su cabecera (ver Figura 1.4). El desnivel máximo entre los puntos de control del sistema 2 es de 78 cm (entre *II* y *o*) en una distancia de 37.3 m (ver Figura 1.5).

Como las distancias lineales medidas entre puntos de control se hicieron sobre el terreno, es decir la cinta se colocaba sobre el suelo tocando los dos vértices, entonces las distancias que se midieron no fueron horizontales (reducidas al horizonte), sino inclinadas, por ello tuvo que hacerse una corrección a todas las distancias medidas para tener las proyecciones horizontales.

Para ello se utilizaron los valores de las cotas que se enlistaron anteriormente (alturas relativas de la Tabla 1.4) y con una relación geométrica simple, se obtuvo el desnivel entre los puntos que forman la distancia a medir. A partir de este desnivel y la distancia inclinada se calcularon las distancias horizontales entre puntos de control. Después de haber calculado los valores angulares promedio y las distancias horizontales entre los vértices consecutivos de la poligonal, se calcularon las coordenadas compensadas por errores de medición angular y longitudinal.

Para el proceso de cálculo se elaboró un programa que realiza las operaciones geométricas y trigonométricas, comúnmente empleadas en topografía, para el cálculo de coordenadas cartesianas de vértices de *poligonales cerradas*. Este proceso se hizo también, mediante la utilización del lenguaje de programación *Turbo Basic*. El programa mencionado, se ha incluido completo en el Apéndice A.3, con explicaciones para cada paso.

El programa utilizado para el cálculo de coordenadas necesita para realizar el proceso, de los siguientes datos en el orden marcado:

1. Número de vértices de la poligonal,
2. Definir, si los ángulos en los vértices son interiores o exteriores,
3. Los valores angulares para cada uno de los vértices de la poligonal,
4. Cada una de las distancias horizontales partiendo del lado 1,
5. Azimut de partida del lado anterior al vértice 1,
6. Coordenadas *X* y *Y* de partida (vértice 1).

El programa responde imprimiendo los siguientes resultados:

1. Error angular total,
2. Precisión del levantamiento,
3. Coordenadas compensadas de los vértices,
4. Azimut y distancia de los lados de la poligonal, a partir de sus coordenadas compensadas y
5. Superficie de la poligonal.

Las exactitudes del levantamiento calculadas para el programa, fueron suficientes para el tipo de levantamiento topográfico realizado. En todos los casos los valores de exactitud fluctuaron, entre 1:700 a 1:900, es decir, un centímetro de error por cada setecientos o novecientos medidos, respectivamente.

1.7.2 Preparación del globo, cámara y marcas topográficas en el sitio, realización de los vuelos y registro de imágenes.

Enseguida se presentan algunas consideraciones de los procedimientos seguidos en campo para la realización de los vuelos. Un paso importante consiste en hacer, previamente a la realización del vuelo, la búsqueda de los clavos y estacas que definen las marcas topográficas fijas en el terreno, las cuales es necesario que aparezcan claramente en las imágenes, ya que servirán, como se dijo antes, para permitir su georreferenciación y su comparación dentro del SIG, en relación a las diversas fechas de evaluación.

En general en el lapso de realización de los vuelos (junio 1991 a diciembre de 1992) la permanencia de las marcas situadas en el terreno fue casi total; pocas marcas no fueron encontradas. Cabe mencionar que el proceso de búsqueda se facilitó al dejar sobre ellas pequeñas rocas amontonadas como referencia.

Es evidente que sería imposible registrar, por la cámara de video, las cabezas de los clavos y las estacas mismas, volando el globo a las alturas mencionadas (13 a 198 m). Es por esto que fue necesario buscar un medio de resaltar, mediante el contraste de colores y/o tonalidades de gris (en su caso), las posiciones precisas de las marcas mencionadas.

Para ello se utilizaron cuadrados de cartón blanco de 23 x 23 cm, señalando con una cruz de cinta adhesiva el centro del mismo. Además, para facilitar la colocación del centro de los cuadrados de cartón, justamente sobre la cabeza del clavo, se realizaron perforaciones pequeñas (1.5 x 1.5 cm) que permitieran observar a través de los cuadrados (ver Figura 1.7 y Foto 1.6).

En relación a esto es importante decir que las experiencias que se fueron adquiriendo y acumulando conforme se iban realizando cada uno de los vuelos, durante el año y medio en que se hizo el trabajo de campo, permitieron mejorar y optimizar las condiciones y los resultados en imágenes de los vuelos realizados.

Uno de los primeros cambios que se hicieron fue el de establecer una mayor cantidad de marcas topográficas alrededor de las cabeceras de las cárcavas, para tener así un mejor ajuste al asignar coordenadas a las imágenes. En varios casos lo que se hizo, para evitar un levantamiento extra de estas nuevas marcas establecidas, fue ubicarlas exactamente a la mitad de la distancia entre dos puntos adyacentes previamente establecidos.

Otro de los cambios que se hicieron fue el modificar las dimensiones de los cuadrados de cartón blanco (de 10 x 10 a 23 x 23 cm) situados sobre los puntos de control topográfico, ya que en las primeras imágenes que se digitizaron del primer vuelo realizado, se presentaron dificultades para la apreciación del centro de las marcas.



Foto 1.6 La cabecera de la cárcava I del sistema 1 con los cuadrados de cartón blanco situados sobre los puntos de control topográfico, con el fin de resaltar en las imágenes su posición con precisión.



Foto 1.7 Realización de las tomas de las imágenes de la cuadrícula de referencia para la cuantificación de la deformación causada por el sistema óptico de la cámara empleada y por la *proyección central*.

Otra de las actividades que se tiene que realizar los días anteriores al vuelo es la revisión de las bolsas que forman el globo. Es común que se generen pequeños orificios con el uso continuo de ellas, para corregir esto es necesario sellar con cinta adhesiva los defectos detectados. Para el día del vuelo es necesario tener preparado el equipo completo para el momento en que existan las condiciones óptimas para aprovechar de mejor manera las horas de mayor calma de vientos. El primer paso es inflar con helio las bolsas que forman el globo.

Es recomendable extraer el aire del interior de las bolsas antes de empezar el llenado con helio, ya que de no ser así, se reduce el volumen que puede ser ocupado por el gas ligero y no tiene efectos positivos para la ascensión. Las bolsas se llenan directamente colocando la esquina inferior que no fue sellada con cinta, envolviendo directamente la válvula de salida del gas del tanque, después del llenado se sella el orificio con cinta y se amarra firmemente con el cordón o "*piola*" a las otras bolsas. Es necesario amarrar tantos carretes de hilo nylon a las esquinas inferiores de las bolsas, como número de personas estarán participando en el control del vuelo del globo.

Es muy importante el equilibrar el eje de la cámara en la posición más vertical posible, sujetándola con cinta adhesiva y asegurando su adecuado amarre al "*puente*" del globo (cinta de tela, ver Fotos 1.3 y 1.4). Es conveniente desmontar la tapa de protección del lente ya que es posible que golpee intermitentemente a la cámara (a causa del viento) o estorbar su campo de visión durante el registro de las imágenes.

Es necesario amarrar adecuadamente, las esquinas inferiores de las tres bolsas que forman el globo, formando una figura geométrica piramidal triangular, de tal manera que cada una de las dos esquinas de cada bolsa, se conecte respectivamente a una de las esquinas de las dos bolsas restantes.

Es necesaria la coordinación de las personas encargadas de controlar el globo en el aire mediante los cordones de nylon. Sobre todo cuando no hay una calma absoluta de viento. Sin embargo es importante decir que es posible controlar el globo por dos personas, en condiciones de calma absoluta de vientos. De esta manera se hizo para el vuelo de diciembre de 1992. Después de realizado el vuelo, es fundamental revisar la información registrada en el videocasete (inmediatamente después de bajar el globo), para asegurar así, que se haya cubierto el área de interés con la resolución programada.

1.7.3 Condiciones de tiempo atmosférico durante la realización del vuelo con el globo aerostático.

Las condiciones atmosféricas durante la realización del vuelo es un aspecto de suma importancia, debido al condicionamiento que se tiene por la falta de estabilidad del globo, cuando existen velocidades de viento considerables. Para evitar en lo posible esta influencia negativa, es necesario antes de realizar dichos vuelos, hacer un reconocimiento y determinación de horas de calma, para así aprovecharlas y obtener mayor estabilidad del globo y cámara, y de esta manera se tengan como resultado una mayor calidad en las imágenes.

Para el caso de este estudio todos los vuelos se realizaron durante las primeras horas de la mañana (entre 6:00 a 8:30 am) que son las más propicias, por presentarse en la mayor parte de ese lapso, una calma absoluta de vientos.

Por la forma de las bolsas empleadas, la aerodinámica del globo utilizado no permite tener un grado de estabilidad óptimo, para casos en que se tienen que hacer evaluaciones intensivas, a mucho detalle y de áreas grandes, se recomienda el uso de globos comerciales, los cuales son más estables debido a su mejor aerodinámica, aunque su costo puede llegar a ser considerablemente alto (alrededor de 1000 USD).

De acuerdo a lo mencionado en los párrafos anteriores es importante hacer algunas recomendaciones para obtener mejores resultados al realizar los vuelos:

-Es básico aprovechar de la mejor manera posible las condiciones de calma de los vientos a temprana hora de la mañana.

-Tomar en cuenta que existen dificultades para maniobrar el globo cuando se presentan velocidades considerables de los vientos, para ello es necesario contar, preferentemente, con cuatro personas, para un mejor control del globo.

-En algunos momentos cuando el viento no es demasiado intenso es posible "*barrer*" el área de interés, haciendo una maniobra tal, que al conducir el globo en dirección contraria a la del viento, se deja que se eleve y el lente de la cámara capture las imágenes necesarias.

1.8 FASE DE SELECCION Y DIGITIZACION DE LAS IMAGENES (Entrada de la información al SIG).

Como se mencionó antes, inmediatamente después del vuelo es necesario realizar una revisión rápida de las imágenes registradas en la cinta, para corroborar que se ha cumplido con los objetivos establecidos para el vuelo. En gabinete se realiza nuevamente una revisión en la cinta del vuelo total, se van anotando con el contador de tiempo de la cámara la posición en la cinta donde se han registrado áreas de interés.

Después de esto se conecta la cámara a la salida de la tarjeta de digitización de video, instalada élla en la computadora y utilizando el programa de digitización que acompaña a la tarjeta se pueden "*congelar*" casi cuadro por cuadro las imágenes de la cinta, de tal manera que cuando existe alguna de interés se puede registrar ("*salvar*") y generar un archivo digital.

Inicialmente, para las dos primeras fechas de vuelo (junio y agosto de 1991), las imágenes de video fueron digitizadas mediante la tarjeta *Oculus* de transferencia de video a computadora, con una resolución máxima de 320 columnas por 200 líneas (256 tonos de gris y formato del archivo con extensión *.TIF, *Tag Image File* definido por Aldus y Microsoft).

Posteriormente para la tercer fecha (diciembre de 1991), con una resolución de 640 columnas por 480 líneas de celdas o "*pixeles*", con la misma tarjeta de digitización, también en tonos de gris y con el mismo formato de archivo.

En el primer caso, las imágenes que correspondieron a las primeras dos fechas mencionadas, tuvieron que ser posteriormente reescaladas a una resolución de 640 columnas por 480 filas, por un lado para que fuesen las mismas condiciones de resolución para todas la fechas del análisis, y por otro, para que tuviesen una relación de aspecto (relación largo/ancho) de 1.333, la cual es la correspondiente a la que se obtiene con la cámara de video cuando se realizan las tomas originalmente (ver explicación amplia en la sección 1.9.3).

Para la digitización de las imágenes de las dos últimas fechas (julio y diciembre de 1992), se utilizó la tarjeta *TARGA 16 Plus (Truevision Advanced Raster Graphics Adapter)* de transferencia de video, con una resolución de 512 columnas por 482 filas en color natural y con una estructura de archivo del tipo Targa (extensión *.TGA). Para ello se usó el programa de digitización de imágenes Demo T16 de Truevision (*Truevision Image Processing Package*), el cual está incluido como software de la tarjeta mencionada. Esta tarjeta fue elaborada por la compañía norteamericana AT&T (Wu, 1989:164).

Al igual que para las dos primeras fechas, los dos últimos juegos de imágenes tuvieron que ser

convertidos a una resolución de 640 columnas por 480 filas, por las razones antes expuestas. Para todos los casos, las cinco fechas, fue necesario cambiar el formato original de los archivos a formato con extensión *.GIF (*Graphics Interchange File*), tanto en color natural como en tonos de gris, ya que este es un formato que recibe y adapta a su estructura el SIG empleado para el procesamiento de las imágenes (ILWIS, 1992:6.156).

Los procesamientos mencionados, cambios de formato, resolución y escala, se hicieron con el programa *Image Prepare* en su versión para el ambiente *Windows*. Este reescalamiento, el cual se ha especificado como necesario para generar una señal de video estándar, es un requerimiento fundamental, cuando el objetivo del uso de las imágenes es con fines de hacer mediciones geométricas muy precisas, como es el caso que se presenta aquí (ver explicación amplia en la sección 1.9.3).

1.9 FASE DE PROCESAMIENTO PARA EL ANALISIS DE LAS IMAGENES DENTRO DEL SIG.

1.9.1 Procesamiento digital preliminar de las imágenes seleccionadas en el SIG (Realce, revisión y "estiramiento" de histogramas, asignación de colores).

Dentro del procesamiento digital de imágenes, un paso preliminar normal necesario, antes de hacer cualquier asignación de coordenadas y/o correcciones geométricas, es el de realizar una revisión cuidadosa del histograma de frecuencias de los valores que conforman cada imagen. Con ello podemos definir concentraciones, homogeneidades y heterogeneidades de la distribución de las frecuencias de los valores de píxeles, dentro del formato de 8 *bits* (dígitos entre 0 y 255) y a partir de esto elegir qué tipo de funciones de mejoramiento de los rasgos y contraste en la imagen se pueden aplicar (ver Lillesand y Kiefer, 1987:626-644).

Se pueden aplicar diversas funciones de mejoramiento de la imagen por ejemplo, agrupar y realzar con colores específicos intervalos elegidos de valores de píxeles (*segmentación del histograma* o "*density slicing*" en inglés), realzar rasgos lineales del terreno mediante filtros de *convolución lineal* del tipo de "*realce de bordes*" o de "*pasa altas*" ("*edge enhancement filtering*") y distribuir las frecuencias de los valores en el histograma para mejorar la apreciación visual general de la información contenida en la imagen ("*estiramiento del histograma*").

El realce de intervalos de valores de una imagen digital o "*density slicing*" es un proceso que permite al usuario elegir y agrupar, de acuerdo a su experiencia y conocimiento del área (la cual está representada en la imagen que está procesando), rasgos del terreno cuyos valores de reflectancia caen en un mismo intervalo.

Para este trabajo, el realce por intervalos sirvió para agrupar y definir de mejor manera las áreas erosionadas y no erosionadas dentro de las imágenes de las cárcavas, lo que finalmente redundó en una mejor definición en la digitización de los límites de las cabeceras de las cárcavas, en las diferentes fechas, para la estimación de las áreas de suelo removidas (avance de cabeceras).

Este procedimiento fue útil, ya que por la presencia de los suelos rojo-oscuro (en las áreas erosionadas o área de la cárcava), presentaban un contraste marcado con las áreas no erosionadas, donde por la presencia del pasto, los valores de los niveles de reflectancia fueron altos. El contraste era notable, ya que el pasto reflejaba mayor cantidad de luz, asimismo se facilitó esta clasificación "*visual*" al utilizar las imágenes en color natural, deslindando los colores rojo-oscuro de las áreas erosionadas, con respecto a los verde-claro de las áreas con pasto (ver Fotos 1.5 y 1.6, y Figuras 1.35a a 1.35e en la sección 1.11).

El realce de rasgos lineales mediante las funciones de aplicación de filtros de *convolución lineal*

(filtros de *pasa-altas*, "*edge enhancement*") fue útil para la definición posterior, mediante el procedimiento de digitización en pantalla ("*screen digitizing*"), poder delimitar perfectamente y digitizar con segmentos (vectores) el borde de las cabeceras de las cárcavas evaluadas para todas las fechas del análisis.

Un procedimiento normal en el procesamiento preliminar digital es el realce de imágenes, esto es, la modificación de los valores de la imagen para mejorar el despliegue y así dar información mejor detallada al usuario. El realce más simple para el mejoramiento del contraste de la imagen, es el estiramiento lineal del contraste o estiramiento del histograma.

Esta función se aplica en los casos en que existe una frecuencia elevada de los valores de los píxeles en sólo una parte de toda la gama posible (0-255), lo que origina poca diferenciación de los rasgos a causa de la cercanía de tonalidades (de gris o color natural) de los objetos en la imagen. El resultado de utilizar dicha función origina mayores contrastes, ya que se reparten linealmente las frecuencias de los valores de los píxeles en todos los valores posibles. Esta función de realce se aplicó a las imágenes digitizadas en tonos de gris, con el objetivo de resaltar de mejor manera los rasgos de interés para la evaluación, como son los límites de la cárcava en su cabecera y las marcas situadas para el control topográfico (cuadrados de cartón blanco).

1.9.2 Asignación de coordenadas.

El procedimiento de asignación de coordenadas a las imágenes se realizó mediante el módulo de procesamiento de imágenes en el SIG empleado. Este procedimiento consiste en identificar en la pantalla, el pixel que corresponde al centro de las marcas topográficas de referencia, registradas en la imagen, asignándole sus valores correspondientes de X y Y , obtenidos mediante el levantamiento topográfico y el cálculo de coordenadas explicado anteriormente.

El procedimiento de asignación se realiza mediante una técnica simple de ajuste, a partir de una transformación lineal por mínimos cuadrados, entre puntos de control con coordenadas cartesianas del "*mundo real*", con respecto a sus correspondientes en un sistema de referencia filas-columnas en la imagen (ILWIS, 1992:6.2-5). Es requerimiento importante para este proceso una suficiente cantidad de puntos de control, repartidos de preferencia homogéneamente en toda la imagen. También se busca tener el valor de σ (Σ) más bajo, es decir, la sumatoria de los cuadrados de los residuales o sumas de las distancias cuadráticas a la recta de regresión (recta de mejor ajuste), tratando de que en la mayoría de los casos se tuviesen valores menores a la unidad pixel.

En el Apéndice A.4 se han incluido las Tablas A.4.1 a la A.4.11, las cuales simplifican los resultados de asignar coordenadas a las 11 imágenes seleccionadas inicialmente, para el Sistema 1. En este punto cabe aclarar que aunque sólo fueron cinco fechas en el análisis, para el caso de los vuelos realizados en julio y diciembre de 1992, se seleccionaron preliminarmente cuatro imágenes más, para cada una de esas dos fechas, es decir ocho en total.

Aunque posteriormente al proceso de asignación de coordenadas y tomando como criterio de selección los valores más bajos de σ , se eligieron únicamente una imagen para cada una de esas dos fechas (julio y diciembre de 1992). En las Tablas 1.5 y 1.6 se muestran los resultados finales del proceso de asignación de coordenadas para las cinco imágenes/fechas elegidas del Sistema 1 y para las tres del Sistema 2.

En el mismo Apéndice A.4 se han incluido las Tablas A.4.12 a A.4.14 en las cuales se presentan los resultados de la asignación de coordenadas para las tres imágenes elegidas del Sistema 2. En estas tablas se puede observar que, en la mayoría de los casos, la σ fue menor a 1 pixel (cinco de las ocho imágenes que forman el total de los dos sistemas), sólo para tres de las imágenes los

Tabla 1.5 Valores de *sigma* obtenidos en la asignación de coordenadas de las imágenes de la cárcava II del Sistema 1, para las cinco fechas del análisis.

Fecha	Imagen	Pix cm ⁺	PC [*]	Sigma ^{**}
29/06/91	JUN91	1.195	4	0.86
24/08/91	AGO91	1.194	5	0.77
21/12/91	DIC91	1.293	5	1.64
14/07/92	JUL03	1.550	8	1.71
30/12/92	DIC309	2.217	8	0.51

+TAMAÑO DEL PIXEL DE LA IMAGEN. EN cm. *NUMERO DE PUNTOS DE CONTROL UTILIZADOS PARA LA ASIGNACION. **SUMATORIA DE RESIDUALES EN PÍXELES.

Tabla 1.6 Valores de *sigma* obtenidos en la asignación de coordenadas de las imágenes del Sistema de cárcavas 2, para las tres fechas del análisis.

Fecha	Imagen	Pix cm ⁺	PC [*]	Sigma ^{**}
24/08/91	AGO91A	4.744	7	0.86
21/12/91	DIC91A	3.343	5	3.69
14/07/92	JUL92A	3.872	6	0.88

+TAMAÑO DEL PIXEL DE LA IMAGEN. EN cm. *NUMERO DE PUNTOS DE CONTROL UTILIZADOS PARA LA ASIGNACION. **SUMATORIA DE RESIDUALES EN PÍXELES.

Tabla 1.7 Errores sistemáticos de varios orígenes considerados para fines de producción fotogramétrica.

1.No intersección de marcas fiduciales en el punto principal.
2.Expansión y contracción de la película.
3.Distorsión causada por el sistema óptico de la cámara*
4.Distorsión por refracción atmosférica*
5.Distorsión por curvatura terrestre*

*PARA SER CONSIDERADAS EN EL PROCESAMIENTO DE IMAGENES DE VIDEO, DE ACUERDO A LA DISTANCIA FOCAL Y ALTURA DE VUELO EMPLEADAS. FUENTE: MODIFICADO DE WOLF, 1974:92.

valores fueron mayores. El caso extremo fue la imagen *DIC91A* del sistema 2, en la cual se tuvo una σ de 3.7 píxeles.

Estos valores mayores de σ que sobrepasan la unidad pixel se pueden explicar de acuerdo a las siguientes razones:

1. Influye la calidad de la identificación de los píxeles que corresponden a los centros de las marcas en la imagen (cuadrados de cartón blanco sobre los puntos de control topográfico).
2. También depende de la inclinación que haya tenido el eje de la cámara de video en el momento de registrar esa imagen (entre menos vertical esté el eje, habrá mayor deformación y no de igual magnitud en toda la imagen).
3. La disposición y cantidad de puntos de control existentes para la imagen.
4. Finalmente, también influye la precisión con que hayan sido medidas las distancias en campo y calculadas las coordenadas X e Y de los puntos de control, obtenidas mediante el levantamiento topográfico.

1.9.3. Medida de la distorsión producida por la lente de la cámara de video y la deformación resultante en las imágenes obtenidas. Método de calibración de la cámara de video empleada.

Todo sistema óptico de obtención de información luminosa tiene algunos problemas de transferencia y de recepción de esa información, considerando el trayecto desde el objeto que refleja la energía luminosa hasta el plano donde inciden dichos rayos de luz.

Las cámaras de video, por pertenecer a ese tipo de sistemas de obtención de información, sufren de una serie de deformaciones, que en muchos casos son semejantes a las que se consideran en la disciplina fotogramétrica. Tomando en cuenta esto, se puede hablar tanto de aberraciones como de distorsiones causadas por el sistema óptico de la cámara de video (conjunto de lentes).

El aprovechamiento de las cualidades geométricas de las imágenes de video, para la cuantificación de rasgos en el terreno, ha sido escasa hasta ahora. Como se expuso en páginas anteriores, el uso de estas imágenes ha sido sobre todo para fines de interpretaciones visuales (cualitativas), o bien para definir y agrupar características espectrales de los cultivos y tipos de vegetación, usando imágenes obtenidas por cámaras multiespectrales, a partir de su procesamiento convencional en computadora (clasificaciones espectrales).

En trabajos recientes se ha demostrado claramente, que la precisión geométrica de las medidas realizadas en imágenes obtenidas con cámaras de video, equipadas con CCD's como planos de la imagen, pueden ser de manera rutinaria más exactas, obteniéndose comúnmente valores de exactitudes en el orden de un pixel, lo cual representa una alternativa real para la utilización de esta tecnología con fines "*fotogramétricos*" (ver Wong y Taleb-Obaidat, 1992:228).

El objetivo de esta parte del trabajo es el de proponer, desarrollar y probar un método para definir la magnitud de la distorsión en las imágenes de video, obtenidas con una cámara convencional, con fines de cuantificar entidades geométricas de los rasgos en el terreno. La distorsión referida es la causada por el sistema óptico de la cámara y las inherentes a la *Proyección Central* las cuales están en relación directa con la distancia focal utilizada (f).

En la Tabla 1.7 se marcan los principales errores sistemáticos que se producen en fotografías aéreas convencionales con fines de producción fotogramétrica. Dentro de ella se ha remarcado la

corrección del error causado por el sistema óptico de la cámara. Como es de esperarse dicho error se acrecenta conforme se reduce la distancia focal utilizada.

Las distorsiones señaladas con un asterisco se deben aplicar tanto en fotografías aéreas como en imágenes obtenidas con cámaras de video, dependiendo de la altura de vuelo. Es decir a alturas de vuelo menores no es necesario aplicar correcciones, con respecto a las distorsiones 4 y 5.

La distorsión más importante para el caso que se presenta, es la causada por el sistema óptico de la cámara. Y particularmente es la que se refiere a la distancia focal utilizada ya que se realizó con cámara de video y usando una f relativamente pequeña (11 mm).

Existen dos clases de deformaciones causadas por el sistema óptico de las cámaras las *Aberraciones* y las *Distorsiones*. Las primeras afectan a la calidad y a la definición de la imagen. Las aberraciones que se consideran normalmente en fotogrametría son:

1. *Esférica*,
2. *Coma*,
3. *Astigmatismo y curvatura de campo*,
4. *Aberración cromática*.

Ver explicación de cada una de ellas en Wolf, 1974:21-40.

En cambio las distorsiones deterioran las cualidades geométricas de las imágenes. Pueden ser de dos tipos: *Radial* y *Tangencial*. La distorsión radial, como lo dice su nombre, causa que los puntos en las imágenes sean desplazados a lo largo de líneas radiales desde el centro óptico de la cámara (centro de la imagen). Es causado por las fallas durante el pulido de los elementos de la lente al tratar de darles una curvatura adecuada (Wolf, 1974:37).

Si el desplazamiento de los puntos en la imagen es hacia afuera se considera una distorsión positiva y si es hacia adentro (centro de la imagen) se considera como distorsión negativa. La distorsión tangencial se presenta en ángulos rectos con respecto a líneas radiales que parten del eje óptico de la imagen, ésta deformación es causada por fallas en el centrado de los elementos de la lente.

De acuerdo a Wolf (1974:37), la distorsión tangencial es de mucho menor consecuencia y magnitud que la radial, de tal manera que para fines prácticos puede ser despreciada. En cambio la distorsión radial sí es considerada como importante en las correcciones realizadas en estudios fotogramétricos.

Una distorsión que tiene diferente origen, pero que repercute en una deformación geométrica semejante a la distorsión radial antes mencionada (en la forma en cómo se presenta aunque no en magnitud, ya que puede ser mayor en este caso), es la distorsión radial causada en las imágenes debido a las propiedades geométrico-proyectivas de las *Proyecciones Centrales* (ver explicación en los siguientes párrafos). Tal efecto tiene una relación inversa a la distancia focal utilizada, es decir, entre menor sea la f , la distorsión resultante es mayor.

Asimismo, dentro de una imagen específica, la deformación que resulta no es lineal, sino exponencial (aproximadamente cuadrática); es decir conforme los pixeles se localizan más alejados del centro de la imagen los valores de distorsión crecen en relación exponencial.

Esto se debe evidentemente que a distancias focales menores, existe una mayor superficie del terreno que tiene que ser "*registrada*" en el plano de la imagen de la cámara (CCD), provocando tales deformaciones. Esto está en relación directa a las diferentes escalas de registro en una misma imagen, si las comparamos con la resultante "*normal*" en el centro de la misma. Esto es causado

por la oblicuidad y las diferentes distancias de origen de los rayos de luz que inciden y son registrados en el plano de la imagen.

Entre menor sea la distancia focal, mayor es el ángulo de cubrimiento de campo, mayor es la oblicuidad del ángulo de incidencia de los rayos de luz en los extremos de la imagen, mayor es la distancia a que están los objetos que reflejan tales rayos de luz y mayor es el área de campo registrada (ver Figura 1.8). Esto sin considerar las deformaciones inherentes causadas por las condiciones de cambios en el relieve.

En la Figura 1.8, f_2 es el doble del valor de la distancia focal f_1 , dc es la distancia que recorre un rayo de luz en el centro de la imagen hasta llegar al plano de la misma (*Imagen 1* e *Imagen 2* de la figura mencionada), $dex1$ y $dex2$ son las distancias que recorre un rayo de luz reflejado por un objeto en el extremo del área de cubrimiento de la imagen (haz de rayos). En A la diferencia entre dc y $dex1$ (distancia de recorrido de los rayos de luz) es mayor que en B, asimismo el *Cubrimiento 1* de campo es mucho mayor que el *Cubrimiento 2*.

Mayor cantidad de terreno se va registrando progresivamente en un espacio menor del plano de la imagen, originando tales diferencias de escala, esto evidentemente sigue un patrón de cambio de modelo semiesférico lo cual quedó plasmado gráficamente en los resultados que se muestran en la sección 1.9.4.

El procedimiento seguido para la calibración de la cámara de video empleada, es decir, para definir cuantitativamente las deformaciones contenidas en las imágenes que se obtuvieron, para la evaluación del avance de la erosión en las cabeceras de las cárcavas, se sintetiza en el Tabla 1.8 y se explica a detalle en los siguientes párrafos:

El primer paso dentro del proceso fue el imprimir en papel una cuadrícula de 1900 cuadros de 2 cm por lado (50 cuadros a lo largo por 38 cuadros a lo ancho), con el fin de tener una cantidad suficiente de puntos de control (cruces en las esquinas de los cuadrados) que estuviesen repartidos homogéneamente en toda la imagen y cuyas coordenadas fuesen conocidas. La impresión se realizó con un graficador de plumas (plotter) usando el sistema de producción de cartografía automatizada AU2 (ver AU2, 1986).

Con esto se aseguró que las dimensiones de los cuadros fuesen lo más homogéneas y cercanas a lo esperado, para comprobar esto, se midieron aleatoriamente y con escalímetro, algunos lados de los cuadrados impresos en el papel. Las diferencias no fueron mayores a 0.1 mm.

El siguiente paso consistió en pegar el papel cuadrículado sobre un muro vertical. Se colocó la cámara de video sobre el tripié tratando de que estuviese lo más nivelada posible, de tal manera que el eje óptico de la cámara estuviese perpendicular a la superficie del muro, y este último, paralelo al plano de la imagen o del CCD respectivamente (ver Foto 1.7).

Se registraron tres tomas de imágenes de calibración desde una distancia un poco mayor a 1 m, la primera el 17 de febrero de 1993 y las dos restantes el 22 de mayo del mismo año (se presenta la Figura 1.9 para ejemplificar el tipo de imágenes empleadas, la fecha es sólo para identificación de las imágenes, ya que no hay ninguna influencia de ella en los resultados encontrados). La distancia desde la cual se hicieron las tomas con la cámara de video fue la más propicia, definida empíricamente, para tener una buena cantidad de puntos de control, pero que al mismo tiempo fuesen visibles los cruces de las líneas de la cuadrícula mencionada, en las imágenes ya digitizadas.

Se dejó fijo el enfoque a la distancia mencionada anteriormente (>1 m) y se utilizó, en los tres casos, una distancia focal (f) de 11 mm, la cual es la mínima para la cámara empleada. Esta misma distancia fue la que se usó en el campo en todos los vuelos realizados para el registro de

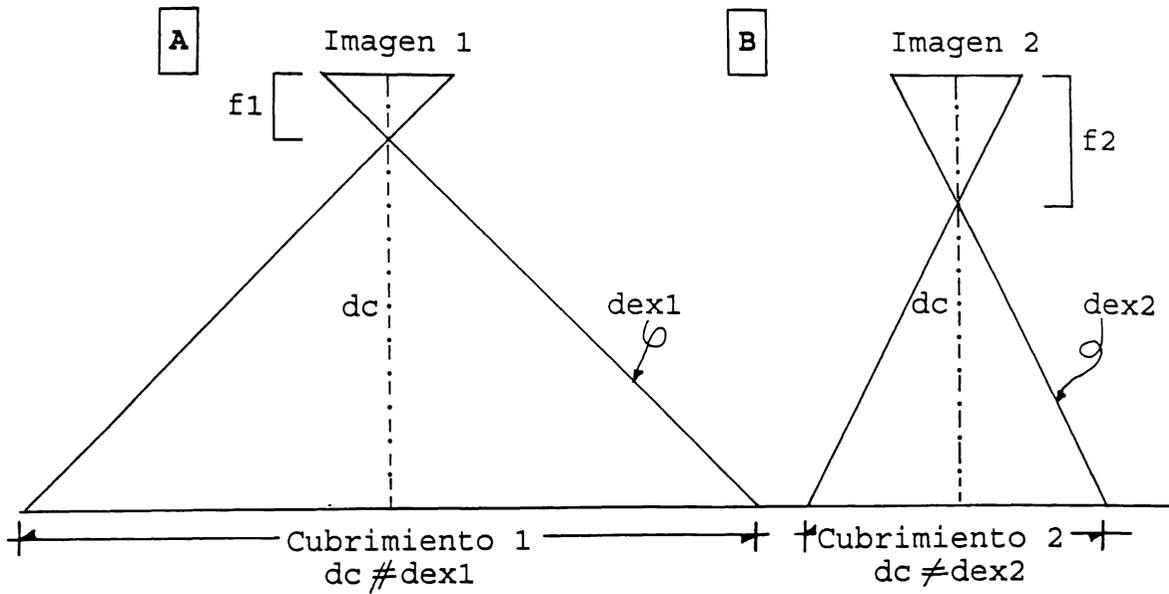


Figura 1.8 Diferencias en cubrimiento, distancias de recorrido y oblicuidad de los rayos de luz, en función de las diferentes distancias focales empleadas. $f2$ es el doble del valor de la distancia focal $f1$, dc es la distancia que recorre un rayo de luz en el centro de las imágenes (*Imagen 1* e *Imagen 2*), $dex1$ y $dex2$ son las distancias de recorrido de un rayo de luz reflejado por un objeto en el extremo del área de cubrimiento de cada una de las imágenes. En A la diferencia entre dc y $dex1$ es mayor que en B, asimismo el *Cubrimiento 1* de campo es mucho mayor que el *Cubrimiento 2*.

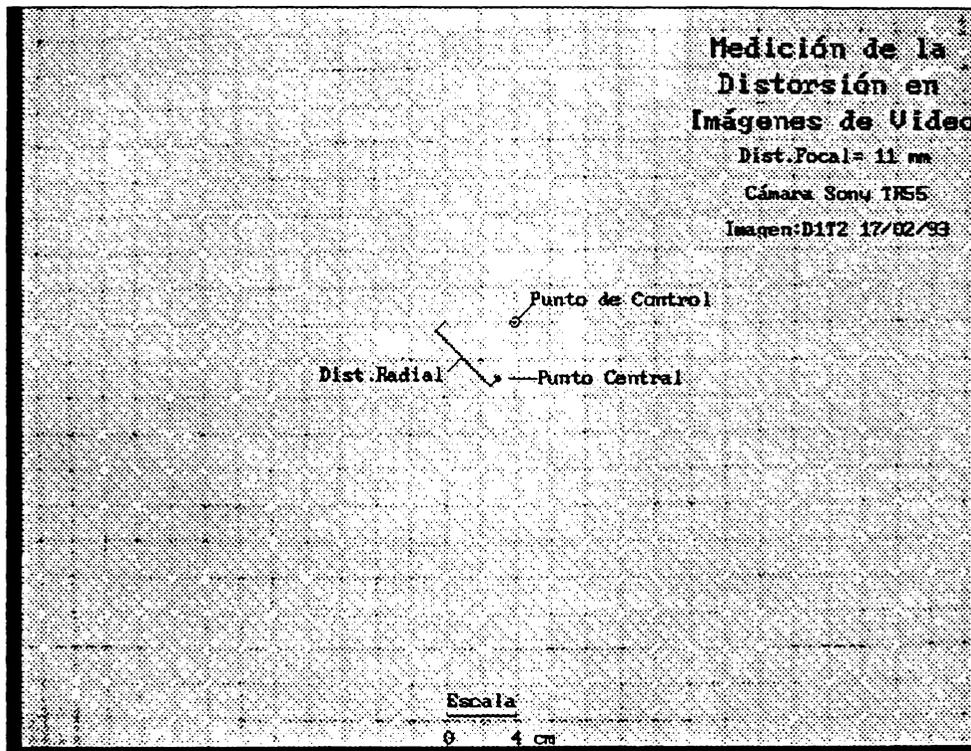


Figura 1.9 Imagen de calibración Toma 1 (D1T2 17/Feb/1993, $f=11$ mm) elegida para cuantificar la distorsión causada por el sistema óptico de la cámara de video y por la forma de registro de las imágenes mediante la *Proyección Central*.

Tabla 1.8 Metodología empleada en la determinación de la distorsión causada por la lente de la cámara de video y la deformación resultante en las imágenes obtenidas.

1. Uso de referencia geométrica dimensionalmente exacta impresa en película indeformable (cuadrícula geométricamente exacta).
2. Obtención de imágenes de calibración en condiciones semicontroladas (Nivelación de la cámara y paralelismo del plano del CCD con el de la cuadrícula). Enfoque automático y manual.
3. Revisión de las imágenes registradas, selección de "cuadros" mejor definidos. Tres imágenes de calibración tomadas a 1.2 m de distancia de la cuadrícula, $f = 11$ mm. Asignación de coordenadas arbitrarias a las tres imágenes.
4. Digitización de las imágenes de calibración elegidas, tarjeta Targa +16, resolución 512 por 482, color natural.
5. Conversión del formato Targa a GIF, reescalamiento, cambio de resolución y aspecto, transferencia a ILWIS.
6. Edición manual de píxeles en el SIG, navegando en las imágenes de calibración, cambiando el valor de pixel en los cruces de la cuadrícula para cada una de las tres imágenes.
7. Obtención de los mapas de puntos de control con el calculador de mapas del SIG.
8. Obtención del archivo de coordenadas X e Y para cada punto de control.
9. Obtención de las distancias radiales desde el punto central de las imágenes hasta cada uno de los puntos de control.
10. Comparación con los valores "reales" de distancias radiales de la cuadrícula y obtención de las diferencias en unidades pixel por punto de control.
11. Preparación de los mapas de distorsión y del modelo tridimensional esférico para fines de observación.
12. Definición de la ecuación de la curva de mejor ajuste para cada una de las imágenes y para el promedio general.

los sistemas de cárcavas, en las cinco y tres fechas de toma respectivamente. Esta distancia focal es la que permite el mayor cubrimiento de campo o cubrimiento de área del terreno, de acuerdo con las características del lente integrado en la cámara. Asimismo con esta distancia focal, en relación a las características ópticas de la lente, es en la que se generan las mayores deformaciones en las imágenes.

Para cada uno de los tres lapsos de tomas mencionados, se eligieron en la cinta (videocasete) dos imágenes respectivamente, seis en total. Ellas fueron digitizadas con una tarjeta de transferencia de video a computadora (*Targa 16 Plus*), la cual presenta una resolución de 512 columnas por 482 filas y registra con una estructura de archivo del tipo *Targa* (extensión *.TGA). Para ello se usó el programa de digitización *Demo T16 de Truevision*, el cual está incluido como "software" de la tarjeta mencionada.

Fue necesario hacer un procesamiento posterior a los archivos de las imágenes digitizadas, esto con el fin de cambiar en primer lugar, su resolución, en segundo lugar la relación de aspecto ($Ra=largo/ancho$), y finalmente, el formato de los archivos de la estructura *Targa* a la correspondiente con extensión *.GIF o *Graphics Interchange Format* (formato diseñado por la compañía *Compuserve*).

El procesamiento mencionado se hizo con el programa *Image Prepare* en su versión para el ambiente *Windows*. Con este programa se cambió la resolución de las imágenes a 640 columnas por 480 filas con 256 colores; con ello se resolvieron dos asuntos importantes, por un lado se mejoró la resolución de las imágenes, y por otro, se les asignó una relación de aspecto ($Ra=1.333$) igual a la "real", la cual es proporcionada por la cámara en el momento de hacer las tomas.

Este reescalamiento que se ha especificado como necesario para generar una señal de video estándar, va de acuerdo a la norma establecida para señales de video (*Clave RS170*) dentro de los *Estándares de la Industria de los Estados Unidos*. En esta norma se especifica que la forma de la imagen de video, o relación entre largo/ancho debe ser de 4/3 (Meisner, 1987:59). Este es un requerimiento fundamental cuando el objetivo del uso de las imágenes es con el fin de hacer mediciones geométricas muy precisas, como es el caso que se presenta aquí.

Una tercer actividad realizada con el programa mencionado anteriormente (*Image Prepare*), fue la de tener un formato de archivo de salida con la estructura *.GIF en color natural y en tonos de gris, de tal manera que pudiese ser recibido y convertido al formato del SIG ILWIS, utilizado para el procesamiento de las imágenes (ILWIS, 1992:6.156).

Después de ser convertidos los archivos al formato ILWIS, se revisaron visualmente en pantalla cada uno de los conjuntos de dos imágenes, para los tres lapsos considerados. Se escogió una imagen para cada lapso (ver sólo un ejemplo en la Figura 1.9), las cuales sirvieron para el procedimiento de calibración de la cámara de video empleada. Para ser más explícitos de aquí en adelante se les llamará *Imágenes de Calibración* a tales imágenes.

De acuerdo al número de cuadros de la cuadrícula impresa, que se encuentran en cada una de las tres imágenes de calibración, se definió un punto central para cada una de ellas, por ejemplo para la imagen de calibración número 1, en la Figura 1.9, a la cual se le llamó Toma 1 (D1T2/17/Feb/1993), se tienen 28 columnas por 20 filas de intersecciones de líneas que definen las esquinas de los cuadrados, es decir, se tienen 560 intersecciones o puntos de control para la evaluación. En este caso el punto central de la imagen correspondió al pixel localizado a la mitad de las distancias entre las columnas 14 y 15 y entre las filas 10 y 11, estas últimas medidas en formato matricial, es decir a partir de la esquina superior izquierda de la imagen.

Para la imagen de calibración número 2, a la cual se le llamó Toma 1 (22/May/1993), se tienen 26

columnas por 19 filas de intersecciones de líneas que definen las esquinas de los cuadrados, es decir, se tienen 494 intersecciones o puntos de control para la evaluación. En este caso el punto central de la imagen correspondió al pixel que se localiza a la mitad de las distancias entre las columnas 13 y 14 y entre las filas 9 y 10.

Para la imagen de calibración número 3, a la cual se le llamó Toma 2 (22/May/1993), se tienen 27 columnas por 19 filas de intersecciones de líneas que definen las esquinas de los cuadrados, es decir, se tienen 513 intersecciones o puntos de control para la evaluación. En este caso el punto central de la imagen correspondió al pixel localizado a la mitad de las distancias entre las columnas 13 y 14 y entre las filas 10 y 11.

Durante el proceso de toma de las imágenes de calibración, se trató siempre de que las líneas horizontales y verticales de la cuadrícula fuesen paralelas con los bordes del "*cuadro*" de toma de imagen de la cámara, aún así siempre existe una desviación a este paralelismo buscado. Es por esto que no es posible usar las líneas extremas de la cuadrícula como ejes de coordenadas para la medición de las deformaciones. Además de que dichas líneas presentan la misma clase de distorsión y aún más en esas porciones extremas de las imágenes, puesto que la deformación es cada vez mayor del centro a la periferia.

El método que se usó aquí para cuantificar las deformaciones causadas por la lente de la cámara y por el efecto de *Proyección Central*, se ha basado en medir en las Imágenes de Calibración (tomadas en condiciones semicontroladas), las distancias radiales desde el punto central, hasta cada uno de los puntos de control definidos por las intersecciones en la cuadrícula y después comparar tales distancias radiales medidas, con respecto a unas distancias "*reales*", calculadas a partir de una cuadrícula geoméricamente perfecta.

Debido a que en las imágenes elegidas para la calibración, las intersecciones de la cuadrícula no se encuentran perfectamente definidas a causa del grosor de las líneas originalmente impresas en el papel y de que, una franja de varias columnas y filas de pixeles representan una de tales líneas en el papel, entonces fue necesario realizar, a partir del programa que facilita la edición de pixeles (*Read Pixel* o *Pixel Info*) en el SIG utilizado, un procedimiento de selección manual de ellos que permitiera definir con precisión los puntos de control correspondientes a cada cruce (ver Figura 1.10). Es decir, "*navegando*" sobre la imagen, visualmente se definió un pixel, que estuviese en la posición más cercana a la intersección de las líneas, en cada esquina, de cada uno de los cuadrados de la imagen.

A cada uno de esos pixeles escogidos, se les asignó un valor (mediante la función de edición de pixeles), para que fuesen perfectamente diferenciables del resto de los pixeles vecinos; para este caso se eligió el valor cero. Se asignó este valor, porque no existía como tal, inicialmente dentro de las imágenes originales empleadas para la calibración.

Los pixeles marcados con el valor cero (0) son los que han definido las posiciones de los puntos de control de las imágenes. Para hacer posible la comparación entre las distancias radiales desde los puntos que se han definido como "*centrales*" hasta dichos puntos de control, y a su vez con respecto a las distancias radiales, desde un punto central de una cuadrícula geoméricamente "*perfecta*", fue necesario seguir el siguiente procedimiento:

-Mediante el Calculador de mapas del SIG (*Map Calculus*), se les aplicó, a cada una de las imágenes de calibración, la siguiente condición:

$$Puntos:=if(Imagen=0,255,0)$$

Esto es, el mapa nuevo que se llamará *Puntos*, es igual a los pixeles del mapa *Imagen* que cumplan la condición de tener valor cero (los puntos de control), los cuales adquirirán un valor nuevo de 255.

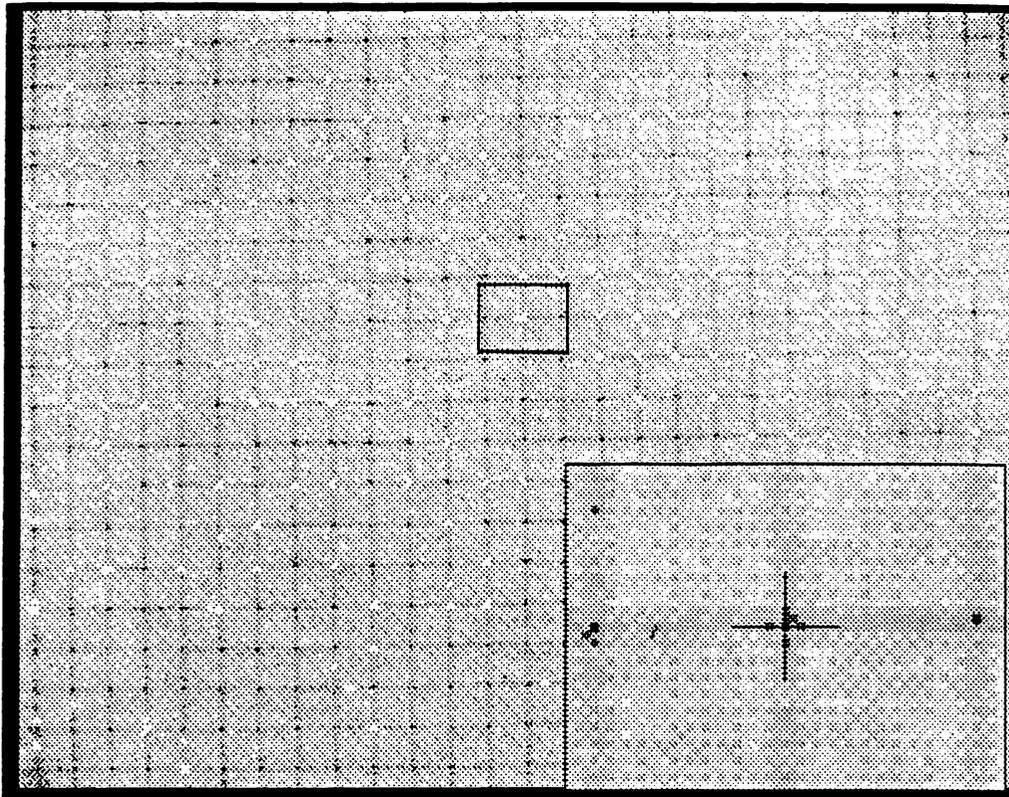


Figura 1.10 Procedimiento de *edición de píxeles* para definir con certeza el correspondiente al cruce entre las líneas de la cuadrícula de calibración.

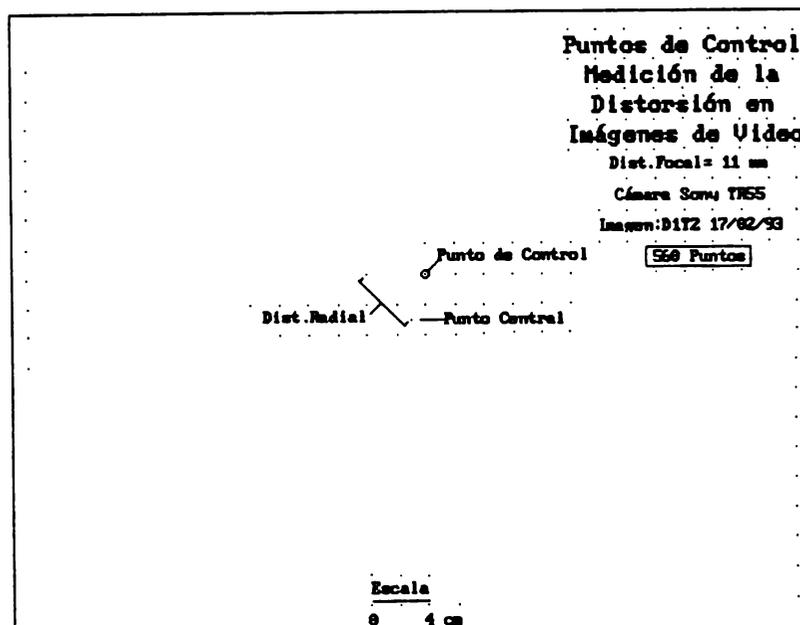


Figura 1.11 Mapa de puntos de control resultado de procesar la imagen de calibración Toma 1 (D1T2/17/Feb/1993), la cual contiene 560 puntos totales. Nótese el "punto central" y la longitud de una "distancia radial" utilizada para calcular las diferencias.

Con este procedimiento lo que se consiguió fue generar un mapa nuevo, donde sólo tienen dos valores de píxeles posibles: cero y 255. El cero asignado a casi la totalidad del nuevo "mapa" (áreas donde no existen puntos de control o bien áreas presentadas en negro en el monitor) y 255, para los píxeles definidos como *puntos de control* o de intersección de líneas de cuadrícula (puntos en color blanco en el monitor). Uno de los tres mapas resultantes con este procedimiento se presenta en la Figura 1.11.

La razón de realizar esta operación, fue para tener un mapa en formato de celdas (*raster*) al cual fuese posible aplicarle la función *Raster-->Points* del SIG (ILWIS, 1992:6.162). Dicha función permitió generar un archivo de coordenadas *X,Y* (en formato *ASCII* extensión **.PNT*), correspondientes a cada uno de los puntos de control o de calibración (píxeles), en este caso con valor de 255.

Es importante aclarar que, previamente a la aplicación de la función anterior, fue necesario asignarle coordenadas a cada uno de los tres "mapas" de puntos de control. Las coordenadas asignadas fueron totalmente arbitrarias y consistió en marcarle al píxel de la parte extrema inferior izquierda de cada imagen los valores $X=1$, $Y=1$; al de la esquina inferior derecha $X=640$, $Y=1$; al de la esquina superior izquierda $X=1$, $Y=480$ y finalmente al de la esquina superior derecha $X=640$, $Y=480$.

Con estos valores de coordenadas las distancias medidas están en unidades píxel, de acuerdo a la resolución del monitor utilizada (640 columnas por 480 filas) durante el procedimiento descrito. Con esto se consiguieron dos cosas, por un lado, tener un sistema de coordenadas que aunque arbitrario permitiera definir distancias radiales desde el "*punto central*" de cada imagen a cada uno de los puntos de control. Por otro lado y antes que lo explicado anteriormente, fue la posibilidad de aplicar la función *Raster-->Points*, en la cual es preferible tener un sistema asignado de coordenadas "*normales*" en relación a la recta numérica (creciente a la derecha en el sentido de las *X* y hacia arriba en el sentido de las *Y*) y no el de un formato matricial filas-columnas a partir del extremo superior izquierdo de la imagen.

Es importante decir aquí que, después de la asignación de coordenadas a las imágenes, se obtuvo, mediante la función de edición de píxeles los valores de coordenadas *X, Y* del punto-píxel definido como "*central*" para cada imagen. Esto con el fin de calcular, con respecto a este punto central, las distancias radiales de cada uno de los puntos de control de las imágenes.

La siguiente parte del procedimiento fue procesar los archivos de coordenadas (*X,Y*), de los puntos de control de cada una de las tres imágenes, en una hoja de cálculo electrónica (*Lotus 123*). Esta parte se inició con la transferencia del archivo *ASCII* de coordenadas, a la hoja electrónica de datos. Una vez dentro del programa mencionado, se calcularon, mediante la fórmula simple de distancia por coordenadas entre dos puntos, cada una de las distancias radiales al punto definido como "*central*" en la imagen.

$$\text{Dist} = \sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2}$$

Al finalizar este cálculo se ordenaron en sentido de menor a mayor todos los datos de distancias. Se tomó como criterio de ordenamiento ("*sorting*"), las distancias radiales recién calculadas.

Aquí surgió la pregunta del, cómo calcular distancias radiales en una cuadrícula geoméricamente correcta, las cuales pudiesen ser comparadas con las de una imagen deformada, sin coordenadas absolutas y donde los ejes de coordenadas no se encontraban definidos en las imágenes, debido justamente a la deformación y al no paralelismo entre las líneas de la cuadrícula y las filas-columnas del monitor.

Para responder a esto se planteó una solución simple. Tomando en cuenta el hecho, demostrado a

partir de conceptos de óptica aplicada, el cual establece que se puede considerar que en la porción central de una imagen (registrada con un sistema óptico en donde los rayos de luz han cruzado tangencial o casi tangencialmente el plano focal) la desviación que sufren los rayos de luz es mínima, la cual puede ser despreciada para fines prácticos.

Por lo tanto tales rayos de luz llegan al plano de recepción de la imagen (plano de la película en las cámaras fotogramétricas o bien plano del CCD en cámaras de video), sin sufrir grandes variaciones en su trayectoria, de tal manera que al ser plasmados en la imagen puede considerarse que su posición es correcta, desde el punto de vista de los conceptos de la geometría proyectiva y de la aberración causada por las lentes de las cámaras (ver Wolf, 1974:34-40).

De acuerdo a lo anterior, se asumió que la porción menos deformada de la imagen es la parte central de la misma, de tal forma que si se miden las distancias en pixeles, de los lados de los cuadrados de la cuadrícula en esa porción, se pueden considerar como valores muy cercanos a la realidad o no deformados.

Para ello se midieron las 16 distancias (lados de los cuadrados) más cercanas al punto definido como central en la imagen. Se obtuvo la media y la desviación estándar de esas distancias. El resultado de la media (redondeado al medio entero más cercano) se tomó como la medida "real" de la cuadrícula en las imágenes, y a partir de ese valor se calcularon las distancias radiales "reales", que servirían como medida de comparación para hacer la calibración de la cámara de video:

Los resultados obtenidos para definir los valores "reales" de longitudes de cuadrícula en las tres imágenes utilizadas para la calibración se marcan en la Tabla 1.9.

Tabla 1.9 Longitudes medias de los lados de la cuadrícula de la porción central de las imágenes, utilizadas para calcular las distancias radiales "reales" en comparación con las de las Imágenes de Calibración.

Nombre Imagen	Long. Media (Pixeles)*	Desv. Est. (Pixeles)**	Redondeo (Pixeles)
D1T2 (17/02/93)	23.313	0.947	23.5
T1 (22/05/93)	24.313	0.464	24.5
T2 (22/05/93)	23.875	0.331	24.0

*VALOR MEDIO DE LAS 16 LONGITUDES DE LADOS DE CUADROS MÁS CERCANOS AL CENTRO DE LAS IMÁGENES DE CALIBRACIÓN EN UNIDADES PIXEL (VER TEXTO). **DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE LOS 16 VALORES CONSIDERADOS PARA CADA IMAGEN.

Con estos valores de longitudes medias de los lados de los cuadrados centrales de las imágenes, se calcularon en *Lotus 123* las distancias radiales "reales", que servirían como parámetro de comparación con respecto a las que fueron medidas en las imágenes de calibración. A cada uno de los 1567 datos (valor de la suma en las tres imágenes) se les restó el de las distancias reales y se obtuvo un valor de diferencia en pixeles.

En la Tabla A.5.1 del Apéndice A.5 se han puesto como ejemplo los resultados obtenidos para los primeros 100 de los 560 puntos de control totales, de la *Imagen de Calibración Toma 1* (D1T2/17/Feb/1993). Las diferencias marcadas en unidades pixel en la columna seis de dicha tabla, corresponden a la resta entre los valores de distancia radial de la *imagen de calibración* (columna cuatro *DRadl ImCalib*), menos el valor de la distancia radial "real" (columna cinco *DRadl Real*).

Es decir si el valor de diferencia es negativo, esto significa que esa cantidad de pixeles hacen falta agregar (aumentar y desplazar), a la distancia radial medida en la imagen de calibración, para que el pixel del punto de control esté en la posición correcta.

1.9.4. Resultados de aplicar el método de calibración.

A partir de los valores de diferencias en distancias radiales, calculados previamente, se generaron, mediante un procedimiento de interpolación lineal a partir de puntos (pixeles), tres *Modelos Digitales de Distorsión (MDD)* uno para cada imagen. Es decir, fueron mapas en los cuales esos valores de diferencia, fueron asignados como atributos de los pixeles correspondientes a cada punto de control de las tres *Imágenes de Calibración*. Es importante recalcar que la interpolación realizada, se hizo a partir de una gran cantidad de datos puntuales y repartidos homogéneamente en todo el modelo mencionado (tres imágenes).

Debido a que en la interpolación, los datos de partida corresponden a valores de distorsión geométrica los cuales siguen un modelo semiesférico, asimismo a que el modelo de interpolación es lineal (no "suaviza" los cambios abruptos) y no de otro tipo como por ejemplo el de *tendencias de superficies ("trend surface analysis")* que si lo hace, entonces la interpolación resultante presentaba (al ser clasificados los mapas de diferencias obtenidos, en intervalos) bordes abruptos o "cuadrados" o cambios fuertes en los valores de diferencias en distancias muy cortas.

Fue por ello que se hizo un "suavizado" en las trayectorias rectilíneas de los límites de las áreas de diferencias, que pertenecen a intervalos adyacentes. Esto se hizo utilizando la función del SIG, correspondiente a la aplicación del filtro de convolución lineal conocido como "smooth" (ILWIS, 1992:6.116). Después de este procedimiento fue posible contar con una serie de matrices o modelos digitales de datos de distorsión, los cuales ya han sido mencionados previamente.

Estos modelos fueron clasificados en intervalos (agrupamiento de pixeles), mediante el programa de cálculo con mapas del SIG y las tablas de clasificación correspondientes, aplicadas a cada MDD. Con este procedimiento se obtuvieron los mapas que se muestran en las Figuras 1.12 a 1.15.

Para la generación del mapa presentado en la Figura 1.15, el cual contiene el promedio general de diferencias entre las dos clases de distancias radiales, para las tres imágenes de calibración en conjunto, fue necesario realizar, mediante las operaciones aritméticas del SIG aplicadas a mapas *raster*, la suma pixel a pixel de los tres MDD y su división respectiva entre tres, para así tener el promedio de las tres imágenes de calibración mencionadas.

Por otro lado y utilizando la base de datos generada, con la hoja electrónica de cálculo *Lotus 123*, mediante la cual se cuantificaron las diferencias en distancias radiales ya mencionadas, se "exportaron" en formato *ASCII* las columnas correspondientes a la distancia radial calculada en las *Imágenes de Calibración*, asimismo la diferencia resultante con respecto a la distancia radial "real" (columna cuatro y seis respectivamente del ejemplo mostrado en la Tabla A.5.1). Con estos datos y utilizando el programa de análisis estadístico *Statgraphics*, se realizó un procesamiento para ajustar los datos a una *curva polinomial* de mejor ajuste del tipo:

$$Y=A_0+A_1X+A_2X^2$$

para cada una de las *Imágenes de Calibración* y para el conjunto de los datos de las tres imágenes (560, 494 y 513 respectivamente y 1567 datos totales, en el eje *X* la distancia radial en pixeles y en el eje *Y* la diferencia de las distancias radiales también en pixeles). Los resultados de los coeficientes calculados (estimados en cuatro iteraciones para todos los casos), para las ecuaciones de dichas curvas se presentan en la Tabla 1.10.

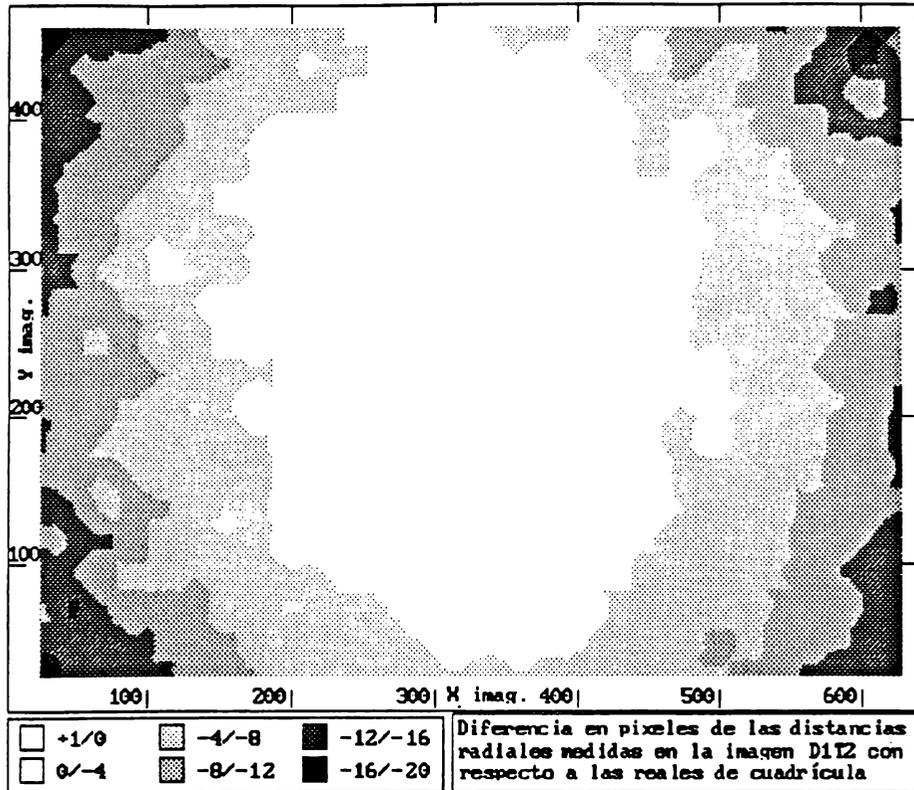


Figura 1.12 Mapa de intervalos de diferencias (en pixeles) resultado de comparar las distancias radiales medidas en la imagen Toma 1 (DIT2 17/Feb/1993) con respecto a las reales o de cuadrícula.

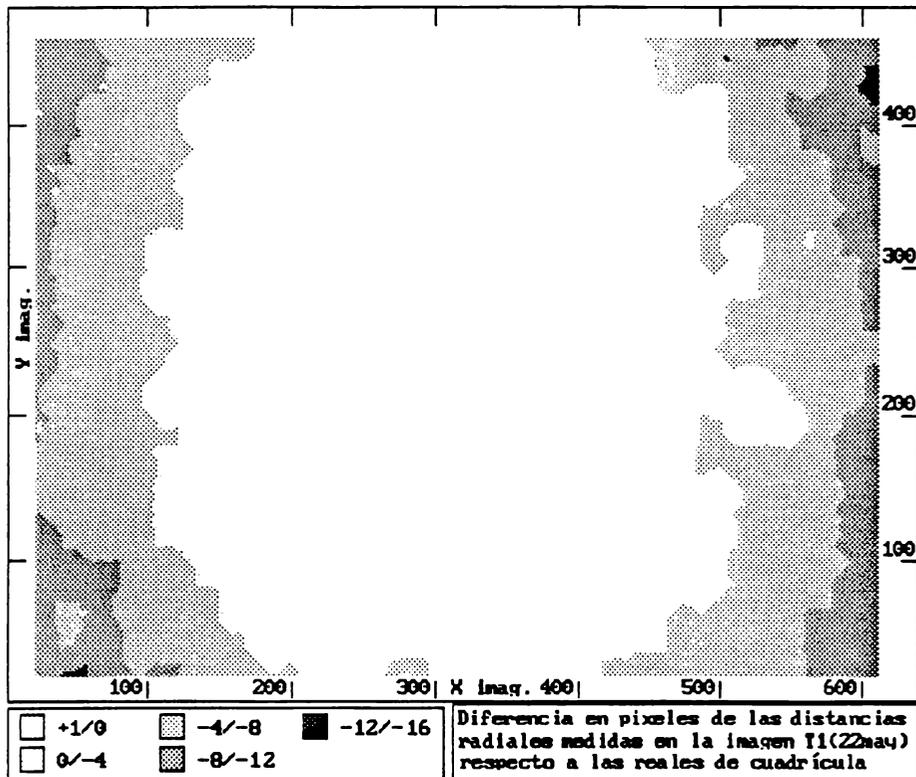


Figura 1.13 Mapa de intervalos de diferencias (en pixeles) resultado de comparar las distancias radiales medidas en la imagen Toma 1 (22/May/1993) con respecto a las reales o de cuadrícula.

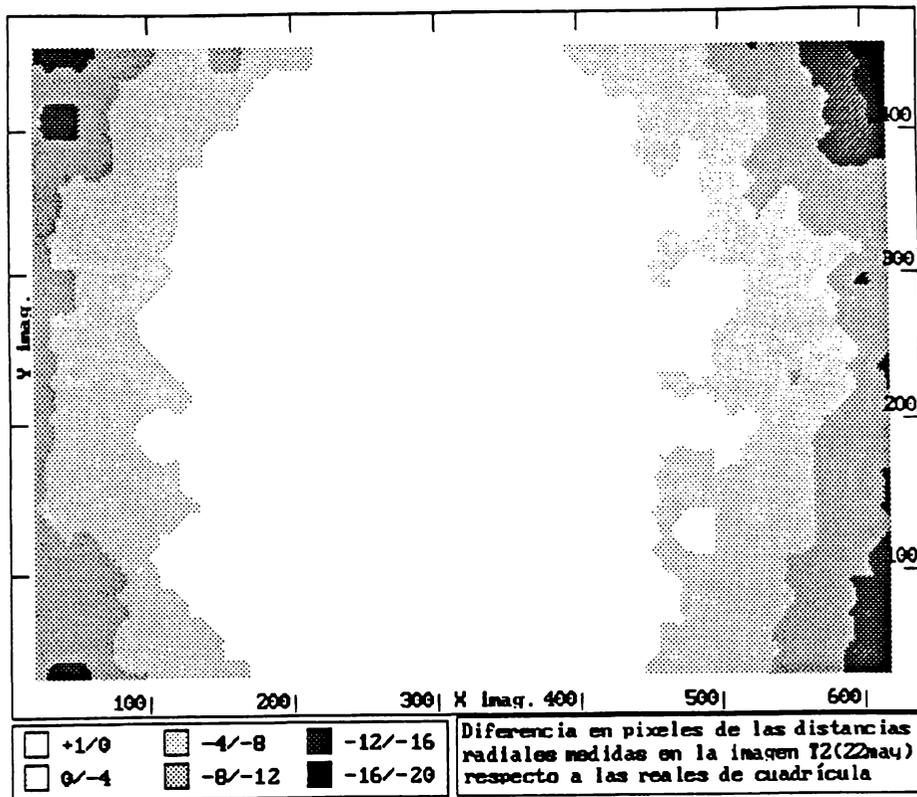


Figura 1.14 Mapa de intervalos de diferencias (en pixeles) resultado de comparar las distancias radiales medidas en la imagen Toma 2 (22/May/1993) con respecto a las reales o de cuadrícula.

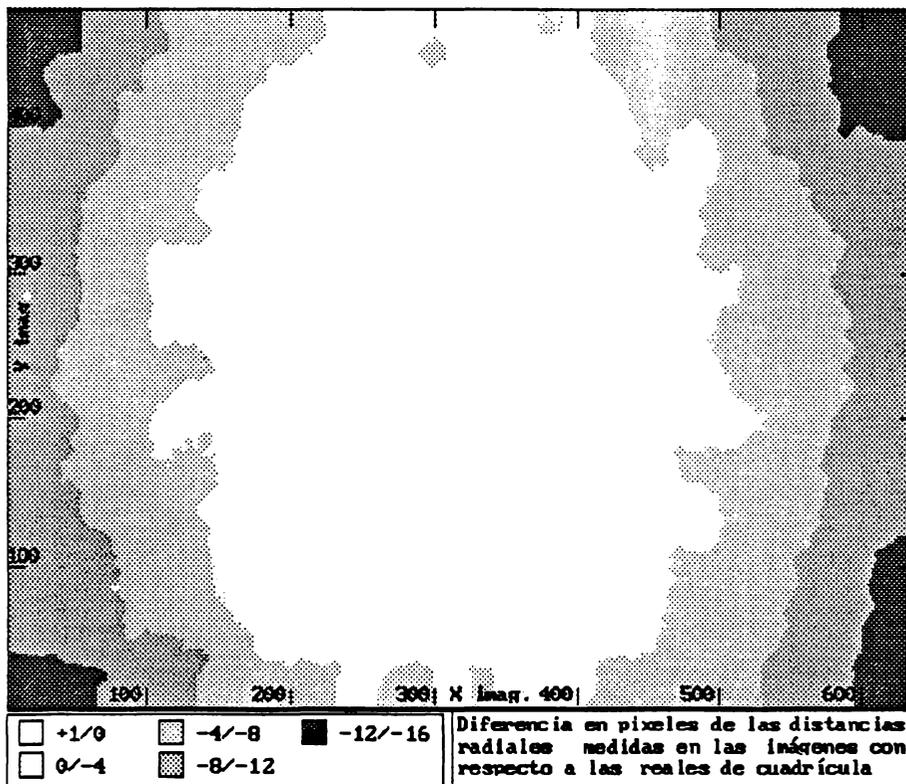


Figura 1.15 Mapa general de intervalos de diferencias (en pixeles) resultado de comparar las distancias radiales medidas en las tres *Imágenes de Calibración* (promedio de sus valores) con respecto a las *reales* o de cuadrícula.

Tabla 1.10 Coeficientes de las tres ecuaciones de las curvas polinomiales de mejor ajuste para cada conjunto de datos de las tres *Imágenes de Calibración* y para su promedio.

Imag. Calibración	Coef. 1 (A_0)	Coef. 2 (A_1)	Coef. 3 (A_2)
D1T2 17/Feb/1993	-0.67050322	0.00701393	-0.00012694
T1 (22/05/93)	-0.79445554	0.01335861	-0.00011437
T2 (22/05/93)	-1.33175913	0.01997879	-0.00014903
Las 3 Imágenes	-1.02927631	0.01486031	-0.00013493

Con este procedimiento se definieron tres ecuaciones de curvas polinomiales de mejor ajuste, para cada una de los tres *mapas de distorsión*, asimismo una ecuación general de distorsión para la cámara de video utilizada, considerando una distancia focal de $f=11$ mm. Los resultados gráficos de dicho procedimiento se encuentran conjugados en la Figura 1.16 y los coeficientes de las curvas en la Tabla 1.10.

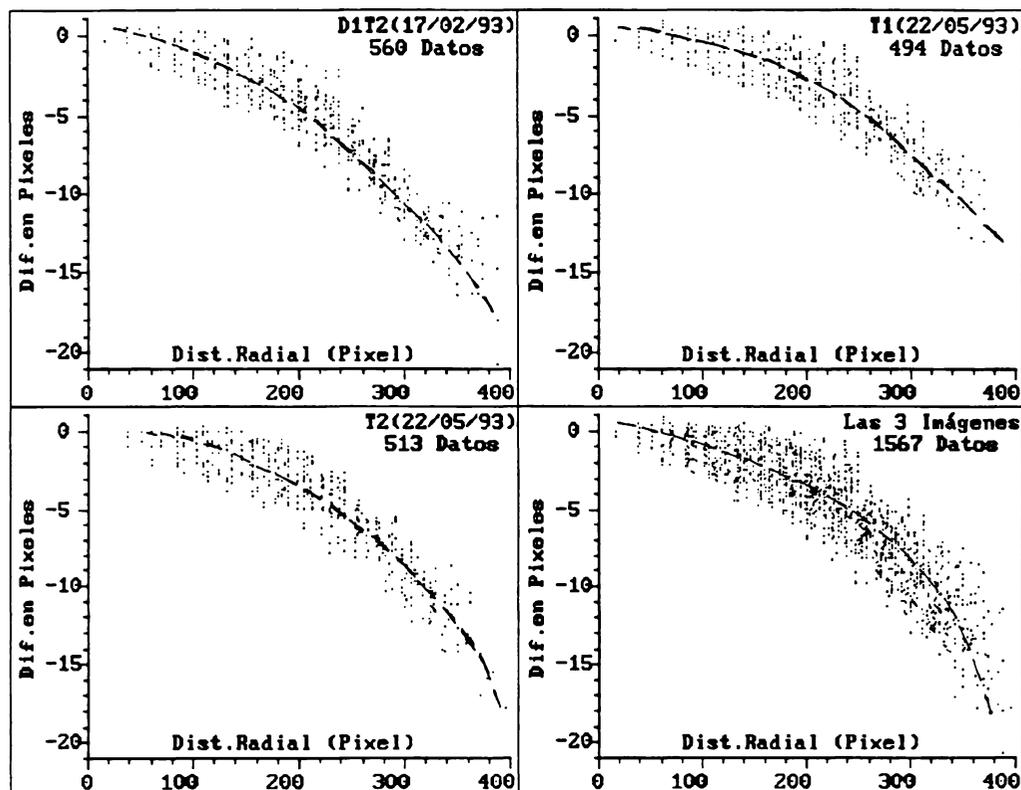


Figura 1.16 Gráficas resultantes del análisis estadístico para definir las tres ecuaciones de curvas polinomiales de mejor ajuste, para cada una de las tres *Imágenes de Calibración*. La cuarta gráfica (abajo a la derecha) corresponde a la integración de todos los datos (1567 puntos de control). Los coeficientes de las ecuaciones de cada una de las curvas están en la Tabla 1.10.

A partir de la ecuación general del modelo, obtenida con las tres imágenes, es posible realizar una corrección inicial que elimine estas distorsiones de las imágenes de video elegidas, antes de realizar cualquier otra operación de análisis y cuantificación geométrica en ellas.

Los resultados de procesar tres imágenes con el método mencionado permitieron establecer una serie de *Mapas de Distorsión* (en unidades pixel) y los parámetros de la curva del mejor ajuste para definir la función esférica de corrección.

Los resultados para las tres *Imágenes de Calibración* mencionadas y para el modelo promedio resultante de ellas, se muestra en las Figuras 1.12 a 1.15. En la Figura 1.17 se muestra un modelo tridimensional de intervalos de diferencias, entre las distancias radiales medidas en las imágenes y las correspondientes "reales". Esta figura fue obtenida a partir de la elección y edición, dentro del SIG, de una vista tridimensional, la cual fue aplicada al *mapa de distorsión* obtenido con el promedio de las tres *Imágenes de Calibración*.

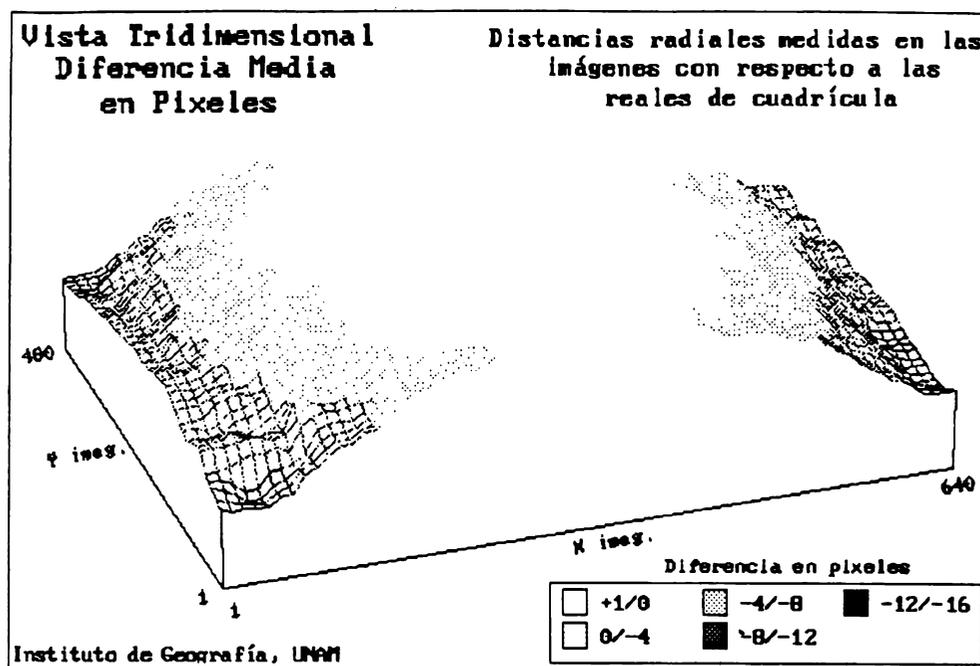


Figura 1.17 Modelo tridimensional de intervalos de diferencias entre las distancias radiales de las *Imágenes de Calibración* con respecto a las "reales" de cuadrícula. La vista fue editada en el SIG y posteriormente se aplicó al mapa de distorsión obtenido con el promedio de las imágenes mencionadas.

Es evidente que la utilidad de este modelo, es exclusivamente para tener una visión más clara del comportamiento de las distorsiones en las imágenes obtenidas. Las "depresiones" de las cuatro esquinas se deben interpretar como correspondientes a sitios en los cuales la distorsión es mayor y se cuantifica en la figura con valores algebraicos negativos. Es decir, las distancias radiales medidas en las *Imágenes de Calibración*, en esos sitios, tienen un "déficit" con respecto a las que tiene una cuadrícula geoméricamente perfecta.

Según Wolf (1974:96-97), existen tres métodos para corregir la distorsión radial causada por el sistema óptico de las cámaras:

1. Búsqueda del valor de corrección en la curva de distorsión radial de la lente, la cual es proporcionada por el fabricante de la cámara;
2. Interpolación de la corrección en una tabla generada a partir de mediciones continuas y sistemáticas realizadas en las imágenes producidas por cada cámara y...
3. Métodos numéricos por medio de los cuales se calculan los coeficientes de la curva de mejor ajuste, para los datos medidos en las imágenes.

Asimismo existe una ecuación que se ha utilizado comúnmente para fines de corrección numérica de la distorsión radial, particularmente en los cálculos de fotogrametría analítica, esta ecuación se estableció por el método de aproximación de la curva de distorsión radial con un polinomio de la forma siguiente (ver Wolf, 1974:97):

$$Ar = k_1 r + k_2 r^3 + k_3 r^5 + k_4 r^7$$

Siendo Ar el valor de la distorsión radial provocada por la lente a la distancia radial r , la cual es medida desde el punto principal de la imagen, los coeficientes $k_1..k_4$ definen la forma de la curva y sus valores se obtienen, al calcular por mínimos cuadrados la curva de mejor ajuste, en relación a una serie de datos obtenidos al medir sobre las imágenes producidas por cada cámara. Los valores r , r_3 , r_5 y r_7 corresponden al cambio exponencial en serie, para los valores de distorsión radial de acuerdo a la forma del polinomio mencionado.

Se optó por dejar como utilizable, la ecuación promedio resultante, del análisis estadístico calculado con las tres *Imágenes de Calibración* y no la propuesta por Wolf (1974). Debido a que esta ecuación de curva polinomial sólo está considerando el efecto de distorsión radial de la lente (sistema óptico de la cámara) y no las deformaciones inherentes a la geometría proyectiva de la *Proyección Central*. Esto se argumenta en base a que, en el caso del análisis fotogramétrico no es necesario realizar correcciones del tipo mencionado (*Proyección Central*), ya que para ese caso no existen tales distorsiones, debido a que las mediciones se realizan en el modelo estereoscópico virtual.

Para tener una idea más clara de lo que significa la distorsión resultante en las imágenes de video analizadas, es posible hacer una consideración de tal efecto en términos de porcentaje de distorsión en las imágenes de calibración. En la Figura 1.18 se muestra un histograma de frecuencias en el cual se han conjugado (en intervalos), los valores en porcentaje de las diferencias entre las distancias radiales medidas en las tres *Imágenes de Calibración* (1567 puntos), con respecto a las "reales" de cuadrícula.

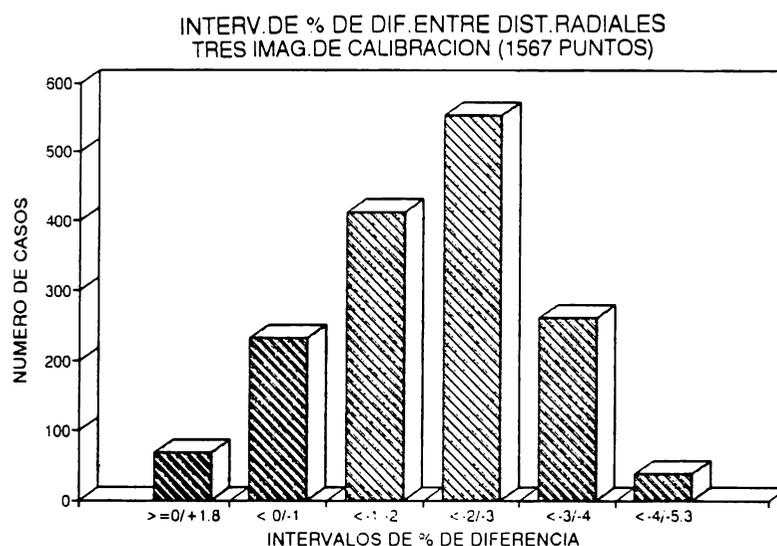


Figura 1.18 Histograma de frecuencias de las diferencias en % entre las distancias radiales reales con respecto a las *Imágenes de Calibración*. En el eje de las X, los intervalos de porcentaje de diferencias y en el de las Y, el número de casos para cada intervalo.

En el eje de las X se han puesto los seis intervalos de porcentaje de diferencias, de las distancias radiales mencionadas, y en el de las Y, el número de casos para cada intervalo. De esta figura se puede concluir que la mayor parte de la superficie de la imagen se encuentra distorsionada en

menos de -2% hasta -3% (35.3% del total de los puntos, 553 casos). Un 26.4% de los puntos de control (413 casos) tuvieron una diferencia de menos de -1% hasta -2%. Un 16.7% de los puntos considerados (262 casos) tuvieron diferencias en el rango de menos de -3% hasta -4%.

Los valores negativos de los intervalos de porcentaje se refieren a que hay un "déficit" en las distancias radiales de la *Imagen de Calibración*, con respecto a las reales, es decir habría que aumentar, con relación a esos valores de porcentaje, a las distancias radiales medidas, para obtener la posición real del pixel correspondiente.

En el Apéndice A.6 se han puesto las Figuras A.6.1 a A.6.4, en las cuales se grafican, en el eje de las X, los valores de distancia radial en pixeles desde el centro de la imagen. En el eje de las Y, los valores en porcentaje de la diferencia entre distancias radiales de las imágenes de calibración con respecto a las "reales". Esto es para cada una de las tres *Imágenes de Calibración* y para el conjunto de todos los puntos de control.

De la parte que se ha considerado hasta ahora es posible concluir que: es fundamental conocer cuáles son las magnitudes y distribución de la distorsión de la cámara que se emplea, esto en relación a las dos variables que se han considerado como importantes, el sistema óptico y la proyección central. Debido a que si no se tiene tal información, se estaría trabajando con gran incertidumbre acerca de las magnitudes de tales deformaciones y dependiendo casi completamente, de la cantidad de puntos topográficos de control, los cuales pudiesen aparecer en las imágenes registradas.

También es importante considerar que los valores de distorsión calculados, obtenidos en porcentaje, los cuales fueron resultado del procedimiento seguido, no son de magnitudes considerables para este ejemplo de aplicación. Por lo tanto se puede concluir que, la corrección de estas distorsiones no son fundamentales en las condiciones de registro de las imágenes, en ese tipo de terreno (poco inclinado), de acuerdo a los objetivos planteados en este estudio.

Cabe aclarar también que, el procedimiento seguido en esta sección llevó, como se dijo antes, a conocer con precisión la magnitud y la distribución de las deformaciones dentro de las imágenes registradas del terreno. Pero no fue posible finalmente aplicar las correcciones necesarias, a partir de las ecuaciones calculadas. Esto se debió a que en el SIG empleado, no existe la posibilidad de elegir y editar los parámetros de ecuaciones polinomiales de corrección, en el módulo correspondiente de corrección geométrica de imágenes.

Un paso posterior a este estudio será el de aplicar las correcciones mencionadas a partir de las ecuaciones obtenidas, y posteriormente hacer un estudio comparativo. Dicho estudio partirá de comparar las exactitudes alcanzadas, al aplicar un método estándar de corrección geométrica (a partir de exclusivamente coordenadas de algunos puntos de control) con respecto a las obtenidas de aplicar el modelo de corrección polinomial definido en esta sección.

1.9.5. Corrección geométrica de las imágenes.

El método de corrección geométrica utilizado, es el que se ha recomendado como el más apropiado, cuando se utilizan fotografías aéreas con el eje de la cámara con una posición no completamente vertical (ver inclinación en fotografías aéreas, Wolf, 1974:249-260), o bien como en este caso, el cual se refiere a imágenes de video, donde por el movimiento del globo, no hay seguridad plena de que en el eje de la cámara haya verticalidad absoluta.

Este método se conoce como *Transformación Geométrica Proyectiva*, consiste en ajustar la posición de los pixeles de acuerdo a un modelo que asume que su nueva posición está condicionada por una relación de tipo *cónico proyectivo*, semejante al de las ecuaciones usadas

para corrección geométrica de fotografías aéreas, de áreas donde no hay desplazamientos considerables por relieve (ILWIS, 1992:6.127).

En el área de estudio de este trabajo, las deformaciones causadas por el relieve son mínimas (como se explicó a partir de los datos de la nivelación topográfica, en la sección 1.7.1.), y las distorsiones principales son por la geometría de la proyección cónica, de los haces de luz, que entran al sistema óptico de la cámara, de acuerdo a la distancia focal utilizada ($f=11$ mm).

Para aplicar este método de corrección se necesitan cuando menos cuatro puntos de control, durante este procedimiento es necesario definir un tamaño de pixel que resultará de la transformación, y además definir cuál es el método de remuestreo que se utilizará. Para los resultados de correcciones presentados en este trabajo se utilizó el método llamado "*vecino más cercano*" ("*nearest neighbour*" en inglés).

Los resultados del procedimiento de corrección geométrica, para cada una de las cinco imágenes/fechas de la Cárcava II del Sistema 1 y para las tres fechas del Sistema 2 se señalan de la Tabla A.4.15 hasta la Tabla A.4.22 del Apéndice A.4, respectivamente. A partir de la revisión de esas tablas se puede concluir que, en la mayoría de las ocho imágenes, los valores resultantes de esas correcciones están indicando que hubo un ajuste aceptable en cuanto a la cantidad de puntos de control y el valor *sigma* (Σ) de ajuste (sumatoria de los errores cuadráticos). En seis de los ocho casos los valores de *sigma* (Σ) son menores a un pixel y en un sólo caso el valor fue mayor (1.43). En el caso en que este valor resultó ser cero (imagen *JUN91*), significa que sólo se tuvieron los puntos de control mínimos necesarios para realizar la aplicación del modelo de corrección mencionado previamente (*Transformación Geométrica Proyectiva*). Como se dijo antes, el valor del pixel se igualó (remuestreó) a 1.2 cm para las imágenes de la Cárcava II del Sistema 1 y a 4 cm para las tres imágenes del Sistema 2.

La siguiente fase correspondió a la realización de un análisis, para definir las diferencias (error medio cuadrático con respecto a la unidad), de los valores de distancias entre puntos de control medidos, en las imágenes corregidas geoméricamente, con respecto a las calculadas a partir de las coordenadas obtenidas mediante el levantamiento topográfico descrito en secciones anteriores.

El procedimiento que se siguió consistió de los siguientes pasos:

Antes de la realización del proceso de corrección geométrica descrito antes, se identificó en la pantalla para cada una de las ocho imágenes, el pixel central de cada marca de referencia (cuadrados de cartón blanco colocados sobre los puntos de control topográfico), después se editó y se cambió su valor del cercano a 255 (color blanco en el monitor) a cero (negro).

Esto facilitó su localización en la fase posterior a la corrección geométrica mencionada. Además, esto permitió seleccionar los pixeles centrales de las marcas y eliminar (borrar) todos los pixeles circundantes para después obtener automáticamente sus valores de coordenadas.

Los archivos de coordenadas de los puntos de control obtenidos, tanto de las imágenes corregidas geoméricamente como de las no corregidas, se introdujeron a la hoja de cálculo *Lotus 123*, asimismo los archivos de las coordenadas de esos mismos puntos de control pero obtenidas con el levantamiento topográfico (coordenadas "*reales*").

Se calcularon (para los tres conjuntos de datos), todas las distancias posibles a obtener de acuerdo a los puntos de control utilizados en cada imagen, es decir, si se consideraron cuatro puntos de control fueron seis las distancias de comparación obtenidas, de cinco puntos 10 distancias, de seis puntos 15 distancias, de siete 21 distancias, etc.

Después, mediante un procedimiento sencillo, explicado y aplicado por Valenzuela y

Baumgardner (1990:219-224), se calculó el *Error Medio Cuadrático (EMC)*, tanto para las distancias obtenidas de las imágenes no corregidas como para las corregidas. Los "errores individuales" se calcularon mediante la fórmula:

$$e_i = (Dist.Real - Dist.Imag.) / Dist.Real$$

Siendo e_i el error individual, *Dist.Real* es la distancia entre dos puntos de control topográfico, calculada con sus coordenadas de levantamiento y *Dist.Imag.* es la distancia calculada a partir de las coordenadas de los mismos puntos de control, obtenidas de las imágenes corregidas (en un caso), como de las no corregidas geoméricamente (en el otro caso).

El *Error Medio Cuadrático Total (EMCT)* por imagen se obtuvo al calcular la raíz cuadrada de la sumatoria (Σ) de los errores individuales al cuadrado. Es decir:

$$EMCT = \sqrt{\sum_i^n e_i^2}$$

La razón de utilizar el *EMC* se debió a que con esto, se evita la "neutralización" o "cancelación" de los errores al conjugar algebraicamente valores positivos y negativos, es decir, mayores o menores que los de comparación o "reales" (*op.cit.*:220).

Los resultados de tales cálculos se muestran en las Tablas 1.11 y 1.12, para las distancias entre puntos de control obtenidas tanto de imágenes no corregidas geoméricamente como corregidas, respectivamente, esto para la Cárcava II del Sistema 1. En las Tablas 1.13 y 1.14 se muestra la misma información pero en este caso para el Sistema de Cárcavas 2.

A partir de tales tablas se demuestra y concluye que, después de realizar la corrección geométrica en las imágenes, el error se ha reducido sustancialmente. Por ejemplo el caso más drástico está en la imagen *JUL03* de la Cárcava II del Sistema 1, antes de la corrección tenía un error del 4.8%, en cambio después de ella resultó con 0.8%. Para el Sistema de Cárcavas No.2 existe un caso similar, la imagen *DIC91A* tenía antes de la corrección geométrica un error de 3.9% y después de ella tuvo 0.8%.

En relación con esto existen casos en los cuales los valores de error *EMC* originalmente fueron muy bajos y evidentemente no cambiaron sustancialmente después de la corrección geométrica, el ejemplo más claro de esto es la imagen *JUN91* de la Cárcava II del Sistema 1, antes de la corrección tenía 0.4% de error y después de ella resultó con 0.1%.

1.9.6. Digitización en pantalla de los límites de las cabeceras de las cárcavas.

La siguiente fase en el procedimiento empleado consistió en trazar el límite o borde de la cárcava (específicamente en su cabecera), mediante la función del SIG conocida como *digitización en pantalla ("Screen Digitizing")* y teniendo como "fondo" en el monitor de la computadora, alternativamente a cada una de las imágenes corregidas geoméricamente, esto se hizo para cada una de las cinco fechas de la Cárcava II del Sistema 1 y para las tres fechas del Sistema 2.

Es de gran utilidad esta función del SIG ya que facilita una serie de procedimientos de unión, delimitación y comparación de rasgos del terreno en diversas fechas, trazando manualmente con el cursor de la tableta de digitización, los segmentos que definen los rasgos de interés para el usuario. Además de permitir un procedimiento "interactivo" de manejo de información de capas de segmentos que se pueden sobreponer en la imagen elegida como "fondo" y agregar o eliminar temporalmente de la pantalla, según se vayan requiriendo. Esta posibilidad se ha utilizado, como

Tabla 1.11 Características de las imágenes y valores de errores medios cuadráticos (con respecto a la unidad), obtenidos al comparar las distancias entre puntos de control, en las imágenes no corregidas geoméricamente y las distancias "reales" obtenidas con el levantamiento topográfico. Las imágenes son de la cárcava II del Sistema 1 en las cinco fechas del análisis.

Fecha	Nombre	Pix cm	Dist**	PC***	ErMedCuad
29/06/91	JUN91*	1.195	6	4	0.0036
24/08/91	AGO91*	1.194	10	5	0.0105
21/12/91	DIC91*	1.293	10	5	0.0051
14/07/92	JUL00	1.194	15	6	0.0598
14/07/92	JUL01	0.999	15	6	0.0836
14/07/92	JUL03*	1.550	28	8	0.0482
14/07/92	JUL04	1.546	28	8	0.0464
30/12/92	DIC309*	2.217	28	8	0.0212
30/12/92	DIC3010	2.215	28	8	0.0171
30/12/92	DIC3011	1.624	15	6	0.0139
30/12/92	DIC3012	2.207	28	8	0.0286

*ESTA IMAGEN FUE POSTERIORMENTE CORREGIDA GEOMETRICAMENTE Y USADA PARA LAS MEDICIONES DEL AVANCE DE LA CABECERA. **NUMERO DE DISTANCIAS DE COMPARACION UTILIZADAS PARA EL CALCULO DEL ERROR MEDIO CUADRATICO (ErMedCuad), CONVIERTA A % ESTE ERROR RECORRIENDO DOS CIFRAS DECIMALES A LA DERECHA EN LOS VALORES DE LA ULTIMA COLUMNA. ***NUMERO DE PUNTOS DE CONTROL UTILIZADOS PARA EL CALCULO DE LAS DISTANCIAS DE COMPARACION.

Tabla 1.12 Valores de los errores medios cuadráticos (con respecto a la unidad) obtenidos al comparar las distancias entre puntos de control, en las imágenes corregidas geoméricamente y las distancias "reales" obtenidas con el levantamiento topográfico. Las imágenes son de la Cárcava II del Sistema 1 en las cinco fechas del análisis.

Fecha	Nombre	Pix cm	Dist*	PC**	ErMedCuad
29/06/91	JUN91	1.195	6	4	0.0011
24/08/91	AGO91	1.194	10	5	0.0034
21/12/91	DIC91	1.293	10	5	0.0036
14/07/92	JUL03	1.550	28	8	0.0081
30/12/92	DIC309	2.217	28	8	0.0106

*NUMERO DE DISTANCIAS DE COMPARACION UTILIZADAS PARA EL CALCULO DEL ERROR MEDIO CUADRATICO.
**NUMERO DE PUNTOS DE CONTROL UTILIZADOS PARA EL CALCULO DE LAS DISTANCIAS DE COMPARACION.

Tabla 1.13 Características de las imágenes y valores de errores medios cuadráticos unitarios, obtenidos al comparar las distancias entre puntos de control, en las imágenes no corregidas geoméricamente y las distancias "reales" obtenidas con el levantamiento topográfico. Las imágenes son del Sistema 2 en las tres fechas del análisis.

Fecha	Nombre	Pix cm	Dist *	PC **	ErMedC ***
24/08/91	AGO91A	4.744	21	7	0.02210
21/12/91	DIC91A	3.343	10	5	0.03939
14/07/92	JUL92A	3.872	15	6	0.01433

*NUMERO DE DISTANCIAS DE COMPARACION UTILIZADAS PARA EL CALCULO DEL ERROR MEDIO CUADRATICO.

**NUMERO DE PUNTOS DE CONTROL UTILIZADOS PARA EL CALCULO DE LAS DISTANCIAS DE COMPARACION.

***ERROR MEDIO CUADRATICO CON RESPECTO A LA UNIDAD. SI SE QUIERE TENER EN PORCENTAJE, RECORRASE EL PUNTO DECIMAL DOS CIFRAS A LA DERECHA.

Tabla 1.14 Características de las imágenes y valores de errores medios cuadráticos unitarios, obtenidos al comparar las distancias entre puntos de control, en las imágenes corregidas geoméricamente y las distancias "reales" obtenidas con el levantamiento topográfico. Las imágenes son del Sistema 2 en las tres fechas del análisis.

Fecha	Nombre	Pix cm	Dist *	PC **	ErMedC ***
24/08/91	AGO91ACO	4.744	15	6	0.01322
21/12/91	DIC91ACO	3.343	10	5	0.00787
14/07/92	JUL92ACO	3.872	15	6	0.00835

*NUMERO DE DISTANCIAS DE COMPARACION UTILIZADAS PARA EL CALCULO DEL ERROR MEDIO CUADRATICO.

**NUMERO DE PUNTOS DE CONTROL UTILIZADOS PARA EL CALCULO DE LAS DISTANCIAS DE COMPARACION.

***ERROR MEDIO CUADRATICO CON RESPECTO A LA UNIDAD. SI SE QUIERE TENER EN PORCENTAJE, RECORRASE EL PUNTO DECIMAL DOS CIFRAS A LA DERECHA.

parte de un método, con fines de delimitación de unidades ambientales físicas, teniendo como imagen de "fondo" el modelo digital de terreno con el relieve sombreado (ver López-Blanco y Villers-Ruiz, 1994).

Lo que se obtuvo al final de esta parte del proceso, fueron ocho archivos individuales de segmentos (*vectores* o arcos), los cuales delimitan las áreas erosionadas y no erosionadas de las cárcavas evaluadas, cinco para la Cárcava II del Sistema 1 y tres para la del Sistema 2. Los cinco archivos de la primera cárcava fueron integrados en uno sólo, mediante la función de integración o "mezclado" de archivos de segmentos ("*Copy&Merge*"). Lo mismo se hizo para los tres archivos del Sistema 2.

Después de haber mezclado los archivos individuales, se digitizaron los pequeños segmentos de unión, en las porciones inicial y final de los límites de cabeceras trazados para cada fecha, para así formar polígonos perfectamente cerrados los cuales delimitarían las áreas de avance, originadas por los procesos erosivos, durante dos fechas consecutivas.

Posteriormente, el procedimiento normal es el de pedir al SIG que realice una revisión de los segmentos ("*Checking Segments*"), esto con el fin de que los polígonos estén estructurados de manera adecuada (cerrados en sus *nodos* o vértices de unión, que no haya trazos erróneos sobre un mismo segmento, etc.). Este procedimiento es para que cada polígono pueda ser considerado como entidad espacial independiente, y con una serie de relaciones topológicas específicas, que permitan su caracterización. Después de probar que la estructura de los segmentos sea la correcta, se inicia el proceso de "*poligonación*" o de creación de polígonos.

1.9.7. Generación de polígonos a partir de los límites de cabecera digitizados en pantalla para todas las fechas de las imágenes utilizadas.

Esta parte corresponde a la creación, asignación de nombre y obtención de una base de datos tabular que caracterice a cada uno de los polígonos creados en la fase anterior (uno para cada lapso entre dos fechas consecutivas de las imágenes). Esto se hizo con el fin de integrar las cantidades de superficie de los polígonos para determinar el avance total de la erosión (pérdida acelerada de suelos).

Debido a que la asignación de coordenadas, que se dio a las imágenes procesadas, fue en unidades cm, entonces los resultados de los valores de superficie fueron también en unidades de cm².

1.10. FASE DE RESULTADOS, INFORMACION DE SALIDA, VALIDACION DEL METODO Y COMPARACION CON MEDICIONES DIRECTAS.

1.10.1. Evaluación del avance de la erosión en las cabeceras de los Sistemas de Cárcavas 1 y 2 y determinación de áreas afectadas.

En esta sección se muestran los resultados del procesamiento descrito para este estudio de caso número 1. En la Tabla 1.15 se han colocado los resultados de cuantificar, dentro de las imágenes de video obtenidas, de la Cárcava II del Sistema 1, el avance en la pérdida de superficie por erosión, para cada uno de los cuatro lapsos definidos, durante las cinco fechas del análisis.

Se puede ver en dicha tabla, que los lapsos considerados no comprenden extensiones semejantes en los períodos (una misma cantidad de tiempo o número de días en ellos), asimismo no coinciden con la misma época del año. El primer lapso considera un período de 57 días, el cual corresponde al 10.3% del total de tiempo considerado, el cual es de 551 días. En este lapso se presentó el 25.7% (3856 cm²) de pérdida de superficie de suelo, dicho período comprende casi desde el inicio

Tabla 1.15 Avance de la erosión en cárcavas, mediciones realizadas en imágenes de la Cárcava II del Sistema 1.

Lapso	Area cm ²
(06/91-08/91)	3855.60
(08/91-12/91)	2303.18
(12/91-07/92)	3231.54
(07/92-12/92)	5587.30



SUPERFICIE DE SUELO PERDIDA TOTAL 14978 cm² = 1.5 m²

Tabla 1.16 Avance de la erosión en cárcavas, mediciones realizadas en imágenes del Sistema 2

Lapso	Area cm ²
(08/91-12/91)	24256.48
(12/91-07/92)	15528.45

SUPERFICIE DE SUELO PERDIDA TOTAL 39785 cm² = 4 m²

Tabla 1.17 Avance de la erosión en cárcavas, mediciones realizadas en campo comparándolas con las realizadas en las imágenes de la Cárcava II del Sistema 1.

Lapso	Area cm ² Campo	Area cm ² Imagen	Dif.%*
(06/91-08/91)	4357.50	3855.60	+13.02
(08/91-07/92)	6005.72	5534.72	+ 8.51
Suma y Dif.%	10363.22	9390.32	+10.36

*DIFERENCIA EN % CON RESPECTO A LOS VALORES DE SUPERFICIE DE AVANCE MEDIDOS EN LAS IMAGENES.

de la temporada de lluvias (junio 29/91) y termina en la parte media de ella (agosto 24/91). El segundo lapso comienza en esa parte media y termina después de finalizada la temporada de lluvias de 1991 (diciembre 21), por lo tanto resulta un período de 119 días (21.6% del tiempo total). En este espacio se presentó un avance en la pérdida de superficie de suelo de 2303 cm², el cual correspondió al 15.4% del total.

El tercer lapso se inicia, como se dijo antes, ya finalizada la temporada de lluvias de 1991 y termina una vez iniciada la de 1992 (julio 14), corresponde a un periodo de 206 días (37.4% del total del tiempo). En este período se presentó un avance del 21.6% (3232 cm²) de la superficie erosionada total. El cuarto período se inicia ya entrada la temporada de lluvias de 1992 y termina después de que ésta ha finalizado (diciembre 30). Son 169 días que equivalen al 30.7% del total. En este período se presentó el 37.3% de avance de la superficie erosionada (5587 cm²).

En la Figura A.7.1 del Apéndice A.7, gráficamente se muestran los avances de superficie erosionada en cm², para cada uno de los cuatro períodos, señalándose en cada caso el número de días que correspondió a cada uno de ellos. En la Figura A.7.2 del mismo apéndice, se muestran los valores de la superficie erosionada (acumulada en % del total) con respecto al valor de porcentaje acumulado del tiempo transcurrido, si hubiese una relación directa entre la cantidad erosionada con respecto al tiempo transcurrido, se tendría en esa figura, una recta con pendiente cercana a los 45°, lo cual no ha sucedido para este caso.

En la Tabla 1.16 se muestra la misma clase de resultados que se mencionaron antes, pero ahora para el Sistema de Cárcavas 2, y sólo para las tres imágenes/fecha obtenidas para su evaluación (dos lapsos). Estos lapsos coinciden en las fechas con el segundo y tercero de la Cárcava II del Sistema 1. Al igual que en el caso anterior, los lapsos considerados no comprenden extensiones semejantes en los períodos, ni coinciden con la misma época del año.

El primer lapso considera un período de 119 días, que corresponde a 36.6% del total de tiempo considerado, el cual es de 325 días. En este lapso se presentó el 61% (24256 cm²) de pérdida de superficie de suelo. Este lapso se inicia en la parte media de la temporada de lluvias de 1991 (agosto 24) y termina después de finalizada ésta (diciembre 21). El segundo lapso se inicia después de finalizada la temporada de lluvias de 1991 y termina una vez iniciada la de 1992 (julio 14), corresponde a un período de 206 días (63.4% del total del tiempo). En este período se presentó un avance del 39% (15528 cm²) de la superficie erosionada total.

En las Figuras 1.19 a 1.23 se muestran los límites de la Cárcava II del Sistema 1 trazados en las imágenes corregidas geoméricamente para las cinco fechas y los cuatro lapsos. A cada una de ellas se le fue agregando el valor de la superficie erosionada y el polígono correspondiente del lapso anterior conjugado, así que la última de tales figuras presenta el avance total de las áreas erosionadas simbolizando cada lapso con diferentes "achurados". En estas figuras, también se ha señalado algunos de los puntos de control topográfico, los cuales fueron resaltados con los cuadrados de cartón blanco, para ser visibles en las imágenes, ellos sirvieron para el proceso de georreferenciación, explicada en párrafos anteriores.

La Figura 1.24 contiene una imagen de todo el Sistema de Cárcavas 2 donde se señala con un recuadro el área específica evaluada (área de seguimiento). Los resultados gráficos para los dos lapsos y tres fechas de análisis, se muestran en las Figuras 1.25 a 1.27. En esa misma figura (1.24) se puede observar y diferenciar con facilidad, las áreas de mayor actividad de caída de "paquetes" de suelo, asimismo se alcanzan a distinguir las marcas en los puntos de control topográfico y sus nombres correspondientes. Esta imagen no fue corregida geoméricamente y por lo tanto no está orientada hacia el Norte.

Por último, con relación a los resultados encontrados, se determinaron las longitudes máximas de avance en algunas porciones de las cabeceras de los dos sistemas evaluados, considerando además

todas las fechas de análisis correspondientes a cada sistema. Los resultados se muestran en la Figura 1.28 para el Sistema 1 y en la 1.29 para el Sistema 2, respectivamente. En estas figuras se ha simbolizado con flechas la dirección del avance dominante de los procesos erosivos evaluados.

En la Figura 1.28 se puede observar que las longitudes máximas de avance detectadas fueron de 60 cm en un caso y de 50 cm en otro, hubo tres áreas pequeñas en las cuales se tuvieron longitudes máximas, estas fluctuaron entre 35 hasta 39 cm. Observando esta figura es fácil definir cuál es la dirección general de avance (eje longitudinal de la cárcava) y la porción más activa de la cabecera. Para el Sistema 2 en la Figura 1.29 los resultados no presentaron valores con longitudes tan amplias, como en el caso anterior. Aquí de nuevo se puede definir que el área más activa de la cabecera, está en relación directa con el eje longitudinal de la cárcava. Este eje coincide con el área en la cual hubo una longitud máxima de avance de 45 cm, y en otra porción diferente hubo un caso de 40 cm. Algunos otros sitios presentaron avances entre 30 y 35 cm.

1.10.2. Comparación de los resultados obtenidos en las imágenes en relación con mediciones hechas en el campo. Procedimiento y resultados.

Para tener un medio, cifras de comparación y evaluación de los resultados obtenidos en las imágenes de video, acerca del avance de la erosión en las cabeceras de las cárcavas monitoreadas, se determinó desde el principio del trabajo utilizar una metodología de campo para medir de manera directa o *tradicional* el borde de las Cárcavas I y II del Sistema 1. El método utilizado fue el de generar, apoyándose en una porción de la cabecera definida previamente, dos puntos de control topográfico que formasen una línea que estuviese perpendicular y paralela a sus lados respectivos, formando un rectángulo perfecto alrededor de las cabeceras mencionadas.

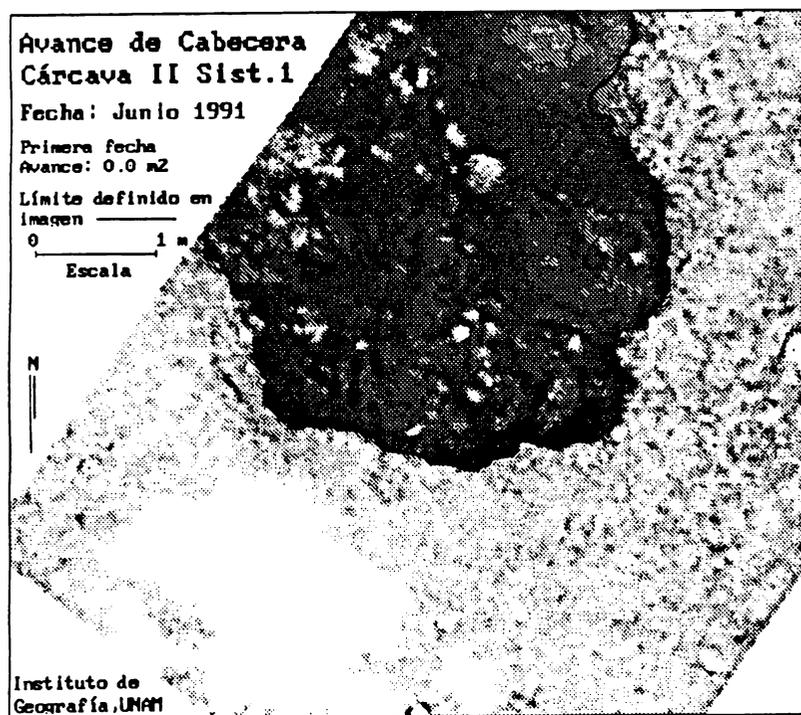


Figura 1.19 Límite inicial de la cabecera de la Cárcava II del Sistema 1 delimitado en la imagen corregida geoméricamente para la primera fecha, tomada el 29 de junio de 1991.

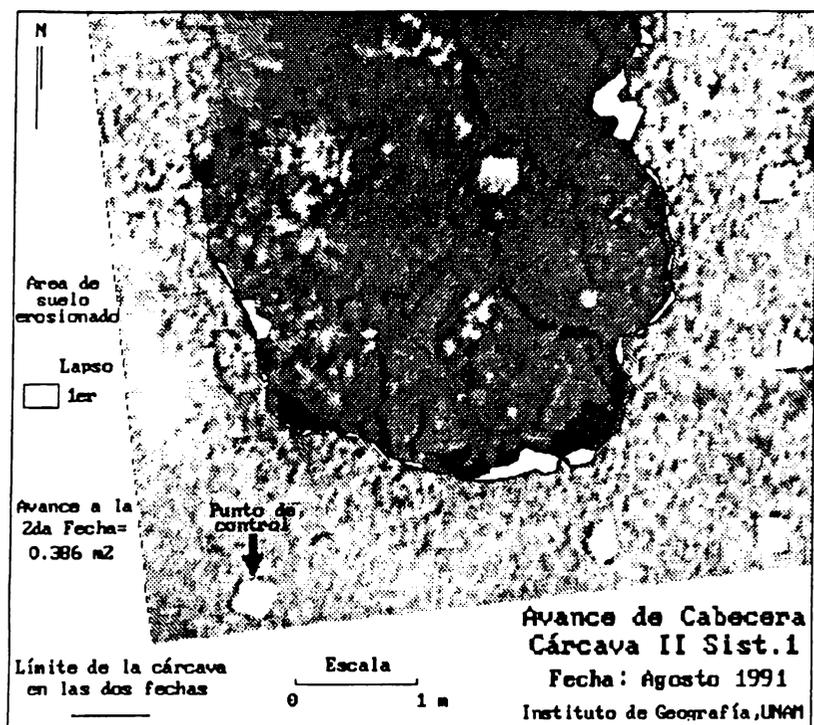


Figura 1.20 Límite de la cabecera de la Cárcava II del Sistema 1 delimitado en la imagen corregida geoméricamente para la segunda fecha, tomada el 24 de agosto de 1991. El área simbolizada corresponde a la superficie de suelo perdida en el primer lapso (0.4 m^2). La flecha señala uno de los puntos de control topográfico.

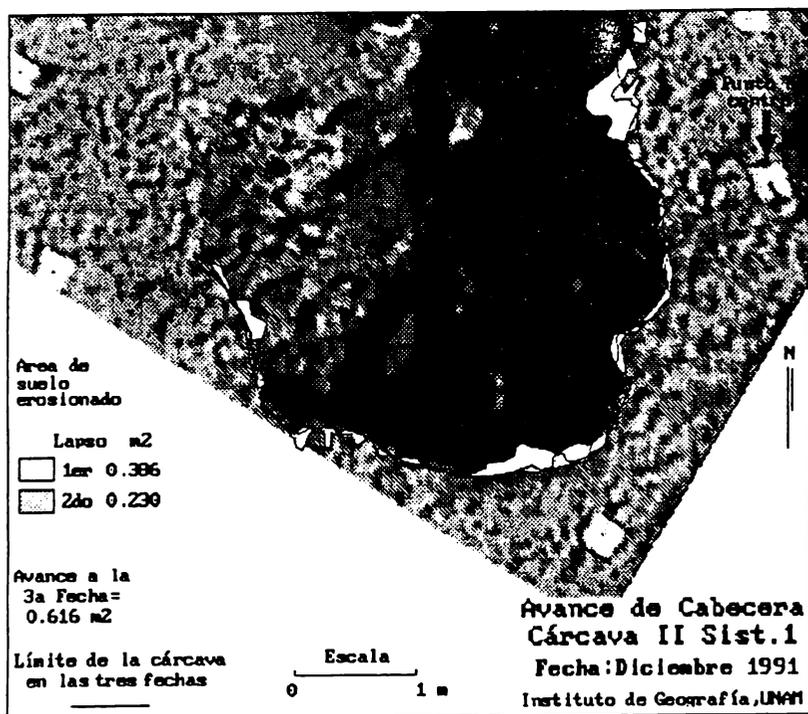


Figura 1.21 Límite de la cabecera de la Cárcava II del Sistema 1 delimitado en la imagen corregida geoméricamente para la tercera fecha, tomada el 21 de diciembre de 1991. Las áreas simbolizadas corresponden a la pérdida de suelo en los dos primeros lapsos (0.6 m^2). La flecha señala uno de los puntos de control topográfico.

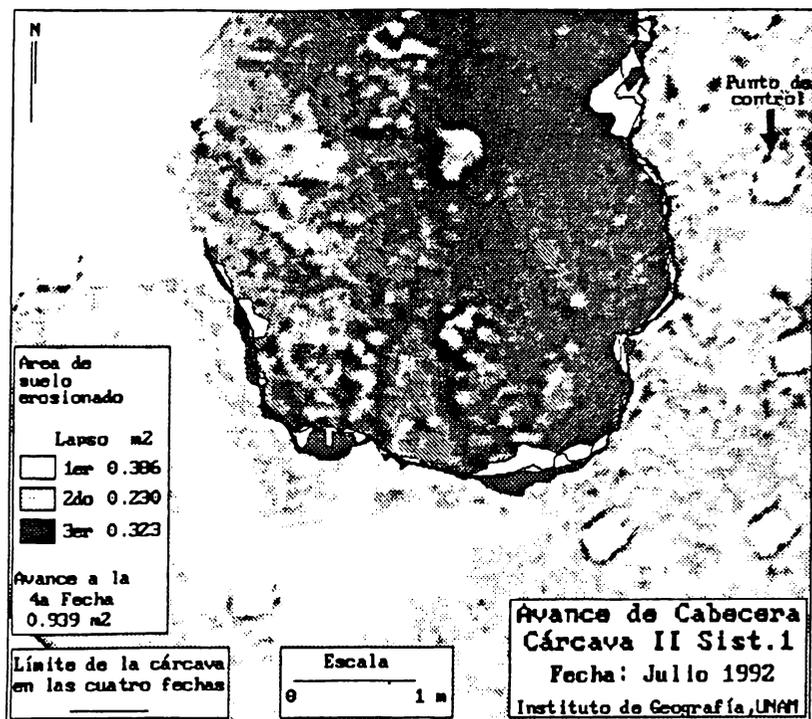


Figura 1.22 Límite de la cabecera de la Cárcava II del Sistema 1 delimitado en la imagen corregida geoméricamente para la cuarta fecha, tomada el 14 de julio de 1992. Las áreas simbolizadas corresponden a la pérdida de suelo en los tres primeros lapsos (0.9 m²). La flecha señala uno de los puntos de control topográfico.

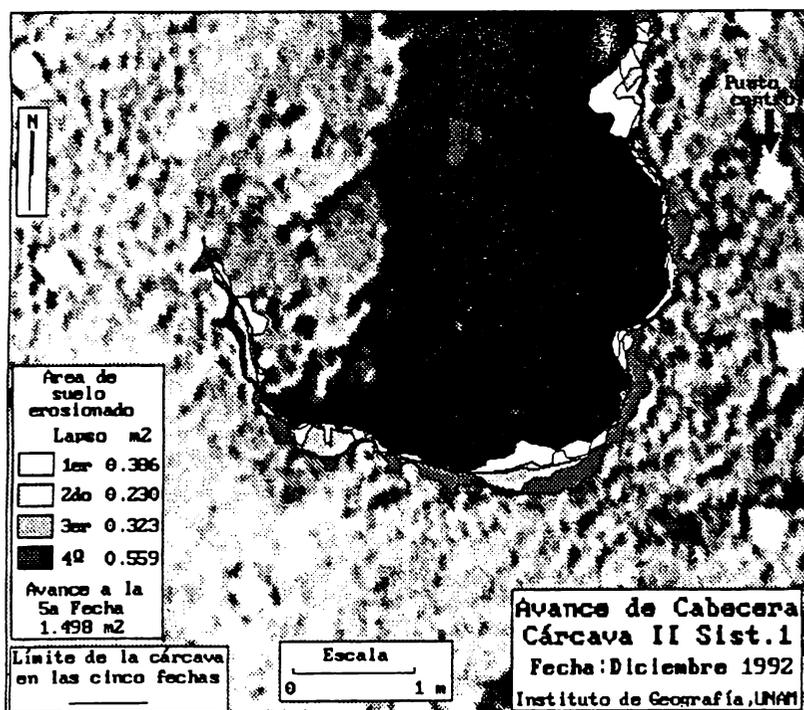


Figura 1.23 Límite de la cabecera de la Cárcava II del Sistema 1 delimitado en la imagen corregida geoméricamente para la quinta fecha, tomada el 30 de diciembre de 1992. Las áreas simbolizadas corresponden a la pérdida de suelo en los cuatro lapsos (1.5 m²). La flecha señala un punto de control topográfico.

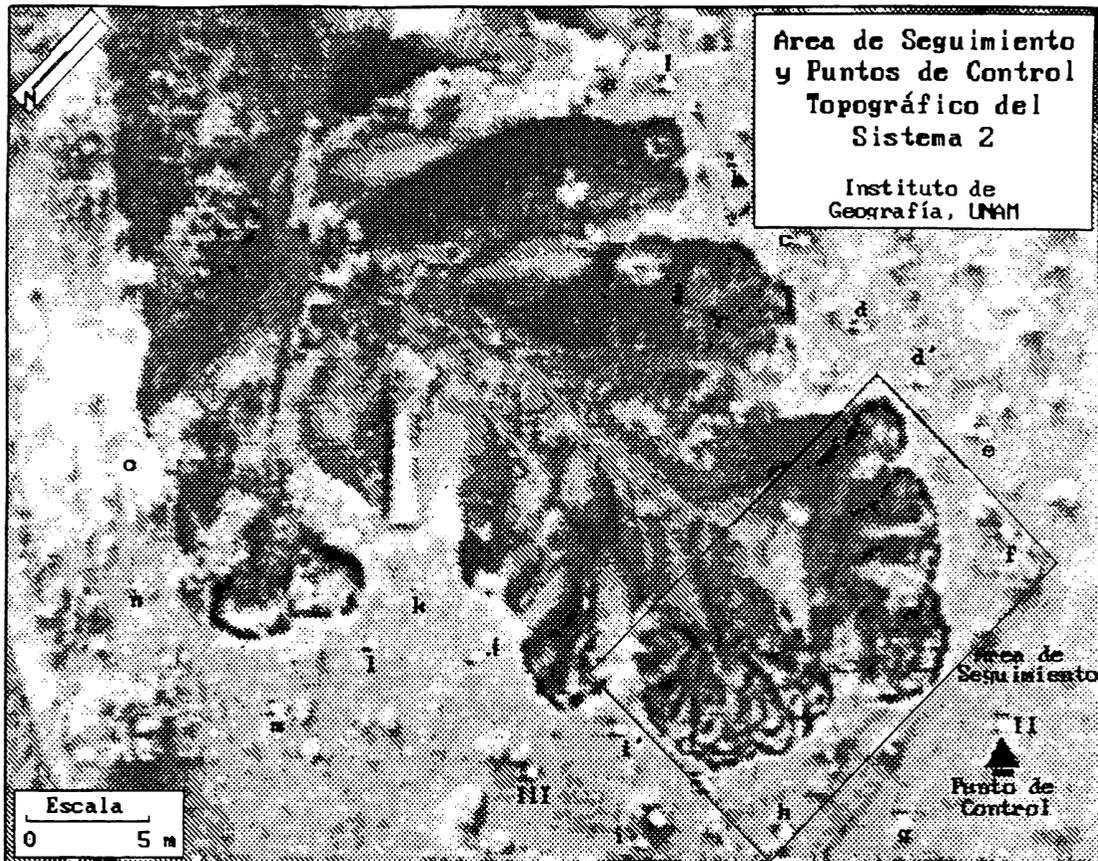


Figura 1.24 Imagen del Sistema de Cárcavas 2 se señala en el recuadro el área específica de seguimiento. Nótese las áreas de mayor actividad de caída de "paquetes" de suelo, asimismo se alcanzan a distinguir las marcas en los puntos de control topográfico y sus claves correspondientes. El tamaño del pixel es de 7 cm, cubre una área de 1487 m² y fue tomada a una altura de 94 m.

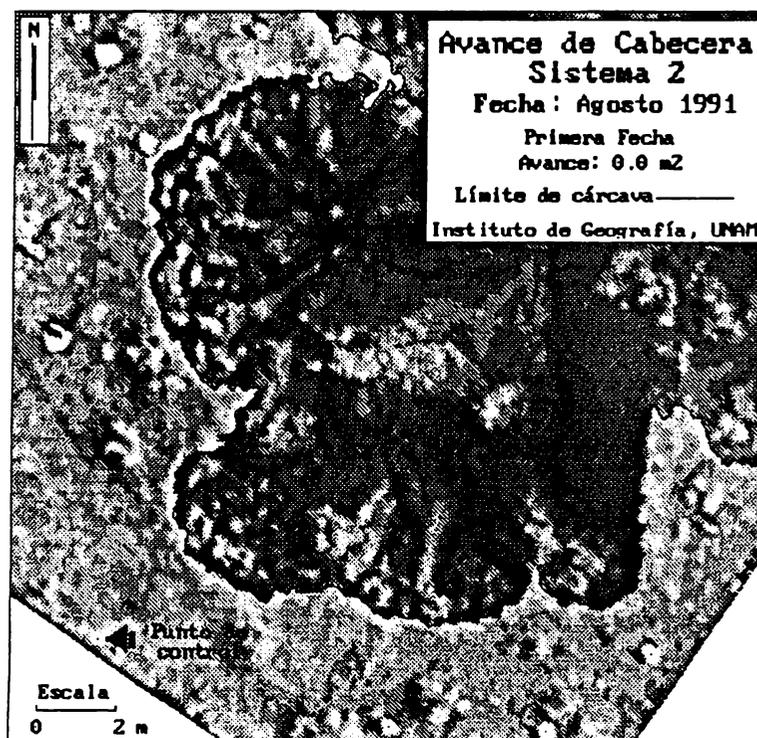


Figura 1.25 Límite inicial de las cabeceras de cárcavas del área de seguimiento del Sistema 2, delimitado en la imagen corregida geoméricamente para la primera fecha, tomada el 24 de agosto de 1991. La flecha señala uno de los puntos de control topográfico.

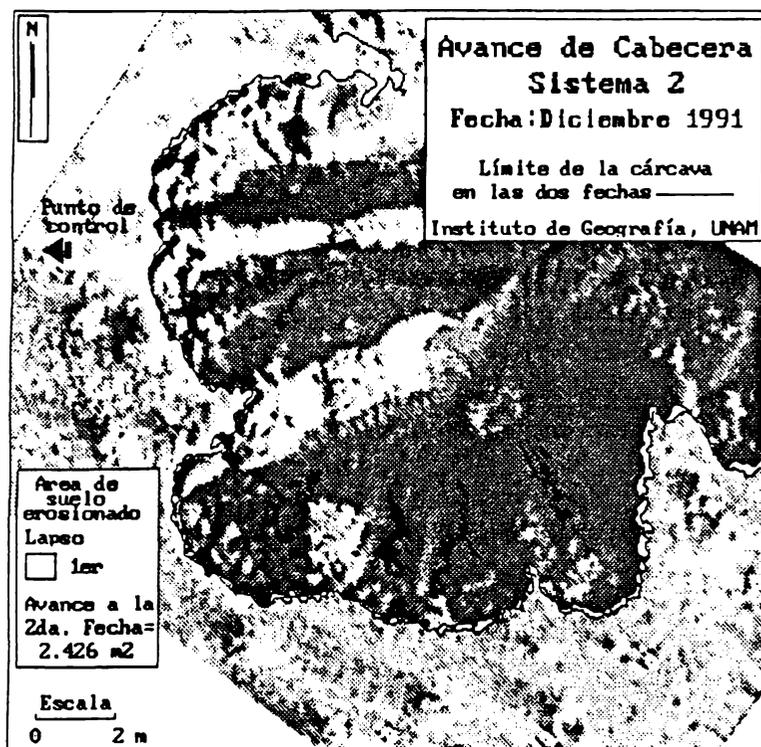


Figura 1.26 Límite de las cabeceras de cárcavas del área de seguimiento del Sistema 2, delimitado en la imagen corregida geoméricamente para la segunda fecha, tomada el 21 de diciembre de 1991. El área simbolizada corresponde a la pérdida de suelo en el primer lapso (2.4 m²). La flecha señala uno de los puntos de control topográfico.

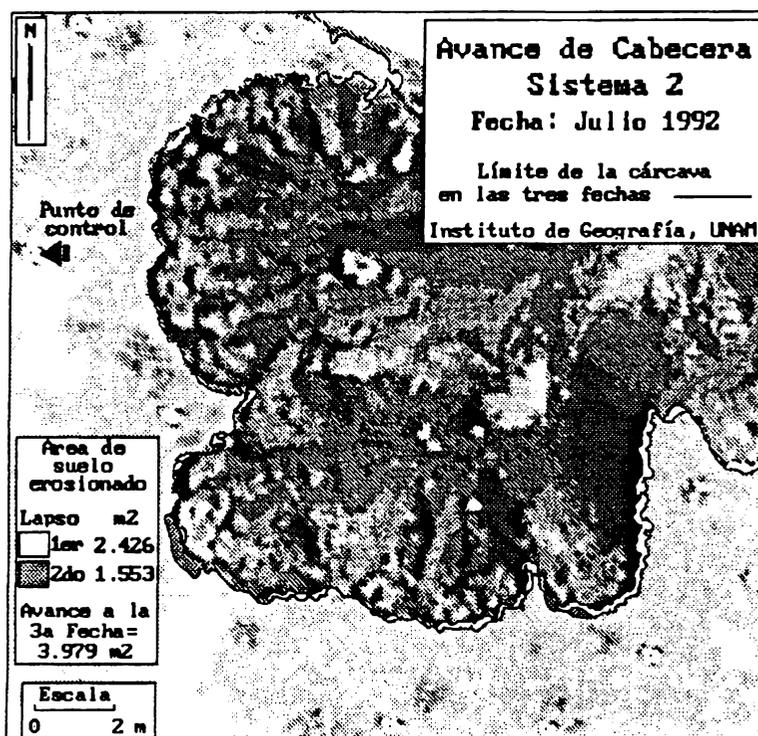


Figura 1.27 Límite de las cabeceras de cárcavas del área de seguimiento del Sistema 2, delimitado en la imagen corregida geoméricamente para la tercer fecha, tomada el 14 de julio de 1992. Las áreas simbolizadas corresponden a la pérdida de suelo en los dos lapsos (4 m²). La flecha señala uno de los puntos de control topográfico.

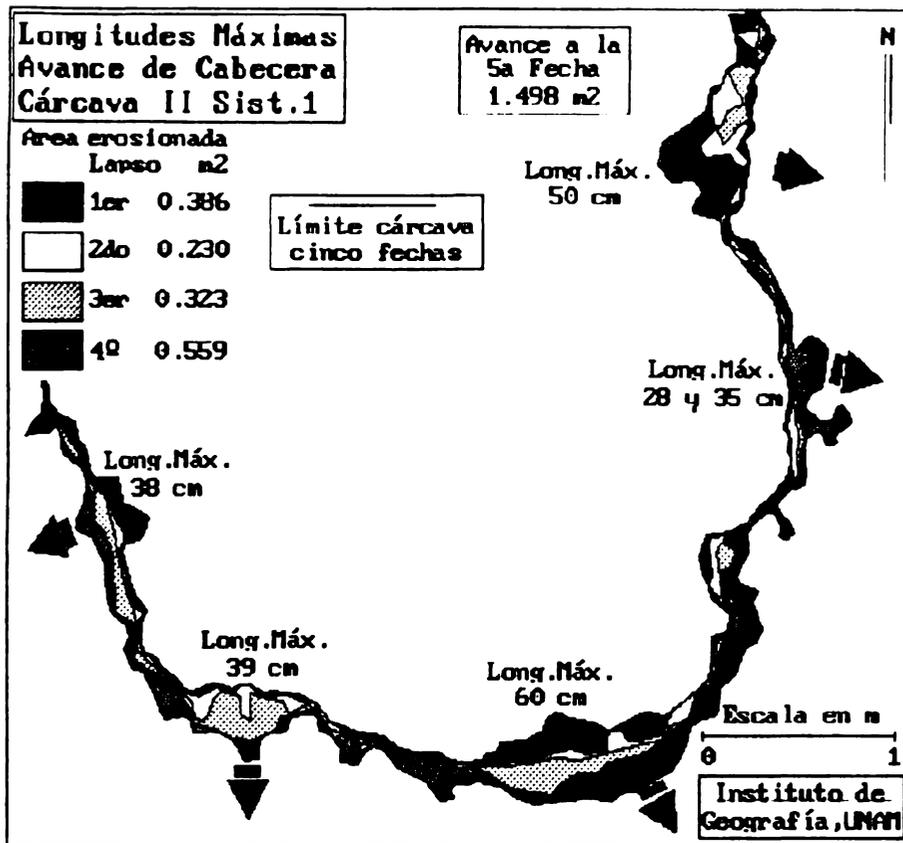


Figura 1.28 Longitudes máximas de avance en la cabecera de la Cárcoma II del Sistema 1, considerando las cinco fechas del análisis. Se ha simbolizado con flechas la dirección del avance dominante de los procesos erosivos evaluados.

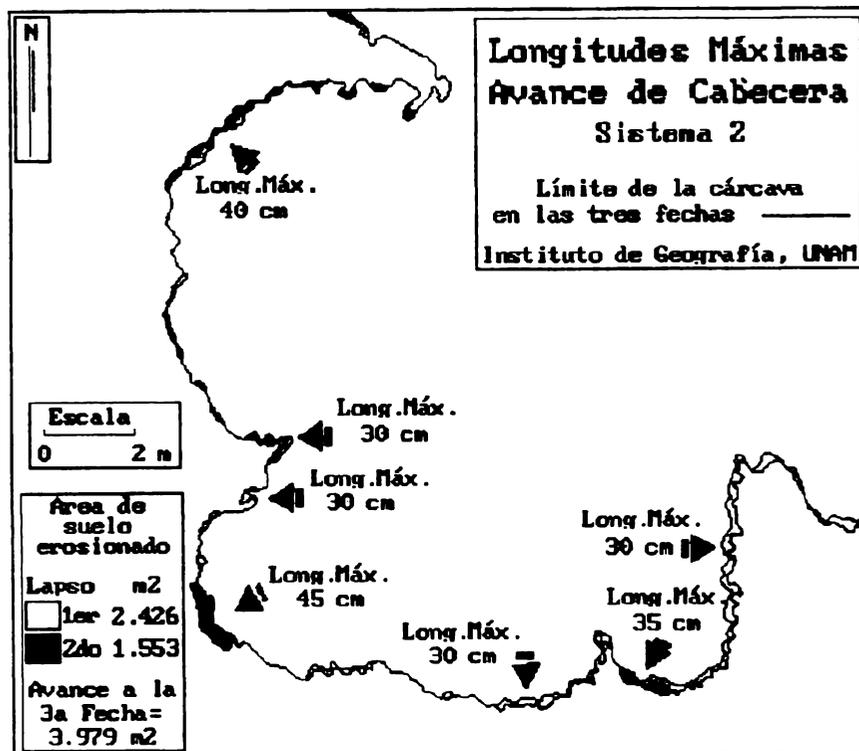


Figura 1.29 Longitudes máximas de avance en las cabeceras de cárcavas del área de seguimiento del Sistema 2, considerando las tres fechas del análisis. Se ha simbolizado con flechas la dirección del avance dominante de los procesos erosivos evaluados.

Para el caso de la Cárcava I del Sistema 1 se utilizó el lado formado por los vértices 1 y 6 para trazar en campo una paralela de 8 m a una distancia de 6 m (ver Figura 1.4 en la sección 1.7.1). En cambio para el caso de la Cárcava II del Sistema 1 se utilizó el lado formado por los vértices *A* y *E* para trazar en campo una paralela de la misma dimensión del lado (4 m) pero a 6 m de distancia (ver Figuras 1.4 y 1.6). En este trabajo sólo se han realizado comparaciones con los resultados encontrados para la Cárcava II del Sistema 1.

Para el trazo de las líneas auxiliares, se utilizó el método topográfico de trazo de perpendiculares a partir de un triángulo rectángulo, definido con un tramo de una cinta métrica, generando lados unidos de 3, 4 y 5 m respectivamente. Se realizó un levantamiento topográfico a gran detalle en las líneas que se determinaron por ese método.

En cada una de estas líneas auxiliares se colocaron sólo temporalmente marcas de referencia (clavos de 2 pulgadas) a cada 30 cm, los cuales sirvieron para, mediante el trazo de líneas perpendiculares desde ellos, hasta el borde de la cárcava, medir esta distancia (en las dos márgenes derecha e izquierda de la cárcava así como en la cabecera) con cinta métrica y configurar las características geométricas de su borde, al unir en el dibujo realizado en gabinete, cada uno de esos puntos localizados.

En las Figuras 1.30 a 1.32 se pueden observar, gráficamente, las diferencias encontradas al definir, por un lado, el borde de la cárcava mediante su digitización en la imagen corregida y por el otro, a partir de las mediciones a cada 30 cm, utilizando las líneas auxiliares de los rectángulos.

Las diferencias fueron tabuladas en relación a las áreas de los polígonos de suelo erosionado, definidas por cada uno de los dos métodos. Como se marca en la Tabla 1.17, las diferencias en porcentaje encontradas, considerando como "*reales*" a las áreas calculadas con los límites definidos en las imágenes, en promedio fueron de +10.4% para el total del período entre junio de 1991 y julio de 1992 y para los lapsos intermedios entre junio y agosto de 1991 fue de +13% y para el lapso entre agosto de 1991 y julio de 1992 fue de +8.5%. Se concluye de esto que cuando menos para los valores medidos en el terreno existe una sobrevaluación de las superficies medidas en campo por métodos tradicionales.

Para evaluar las diferencias de longitudes, medidas en las dos configuraciones o contornos de la cabecera, obtenidas por los dos métodos mencionado, se midieron con escalímetro, en impresiones en papel hechas a escala grande (1 cm=0.2 m), las longitudes de separación entre una configuración y otra. Lo que se observa en las figuras de comparación (1.30 a 1.32) es que, las diferencias de configuración se acentúan cuando existe un cambio de dirección en el borde de la cárcava y coincide con un espacio intermedio de 30 cm entre dos medidas consecutivas realizadas directamente en campo.

En la Figura 1.30 (Junio 1991), las diferencias máximas de las longitudes, van de 10 cm a un máximo de 15 cm. En la Figura 1.31 (Agosto 1991) la diferencia máxima, al comparar lo medido en la imagen contra lo medido en campo, dio un valor extremo de 30 cm. Finalmente para la Figura 1.32 (Julio 1992) los resultados impresos muestran una diferencia máxima de 13 cm.

1.11. DISCUSION Y CONSIDERACIONES FINALES.

Se concluye de los resultados mostrados en la sección 1.10.1, que no existe una relación directa entre el lapso considerado con respecto a la superficie de pérdida de suelo. El caso más drástico es en el primer lapso evaluado en la Cárcava II del Sistema 1, en ella, durante un 10% del tiempo considerado, se presentó casi un 26% de su extensión erosionada.

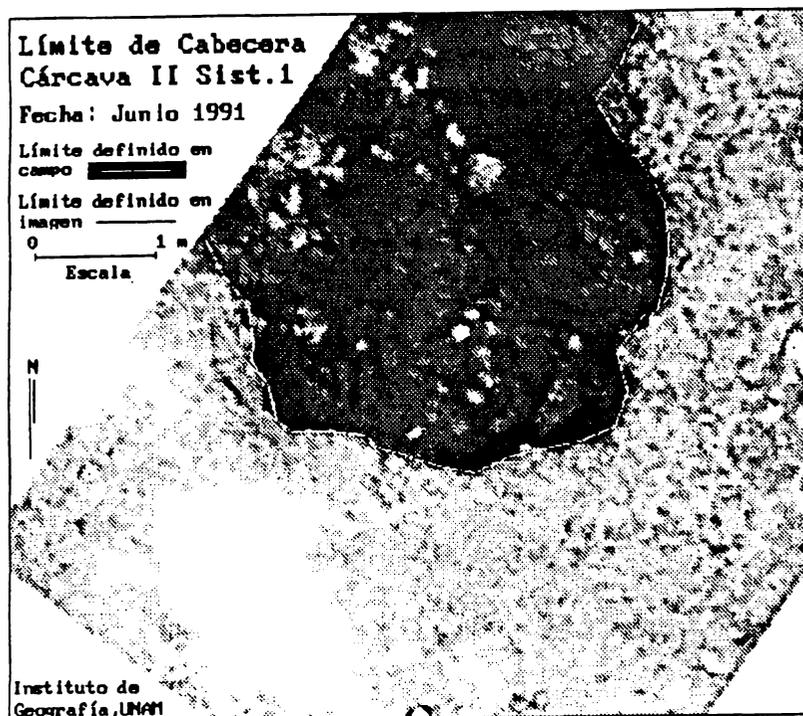
Los procesos de avance no son continuos en el tiempo, sino que funcionan intermitentemente. A

partir de los resultados mostrados, se puede asumir que, normalmente se presentan caídas de *paquetes* de suelo en lapsos muy cortos, sobre todo durante o inmediatamente después de la presencia de tormentas de larga duración. Posteriormente a estos eventos, se presentan etapas relativamente largas de no avance o de estabilidad, esto en la porción de la cabecera inicialmente afectada, perdurando hasta la presencia de un nuevo proceso que desencadene, en el mismo sitio, una nueva caída de *paquetes*.

También se concluye que, en apariencia, el valor de superficie perdida de suelo es relativamente bajo (casi 1.5 m^2 en un lapso de poco más de año y medio). Como se dijo antes, esto puede ser muy relativo, ya que si se toma en cuenta que el 5% de la superficie del municipio presenta áreas con cárcavas, y asumiendo que tales cabeceras, en términos generales, podrían presentar valores similares de avance en la pérdida de superficie, entonces los resultados de hacer esta estimación seguramente producirían valores considerablemente altos.

Además, considerando los datos desde una perspectiva diferente, es posible hacer una estimación de la intensidad de los procesos de avance de la erosión, en relación a la superficie de la cabecera de la cárcava, y asumir que los procesos de avance de las superficies erosionadas, en las diversas cabeceras, actúan de forma homogénea para todas las del municipio.

Si se considera entonces, que tan sólo para el área de la cabecera de la cárcava, para este caso específico (cárcava II del sistema 1), es de aproximadamente 11 m^2 (superficie formada por el perímetro del área más afectada en la cabecera), y si se calcula una relación con respecto al valor en m^2 de la superficie perdida, entonces resultaría que un 14% del total del área de cabecera fue erosionado durante el año y medio evaluado. Entonces en este caso se puede ver claramente, que los valores de superficie de avance de la erosión podrían ser considerables para el municipio de Huasca.



BIBLIOTECA
DR. JORGE A.

Figura 1.30 Diferencias entre los límites de la cárcava obtenidos a partir de la imagen de video con respecto a las mediciones directas a cada 30 cm. Es la misma imagen utilizada en la Fig.1.19 sólo que se ha agregado aquí el límite de la cárcava obtenido en campo. Tomada el 29 de junio de 1991.

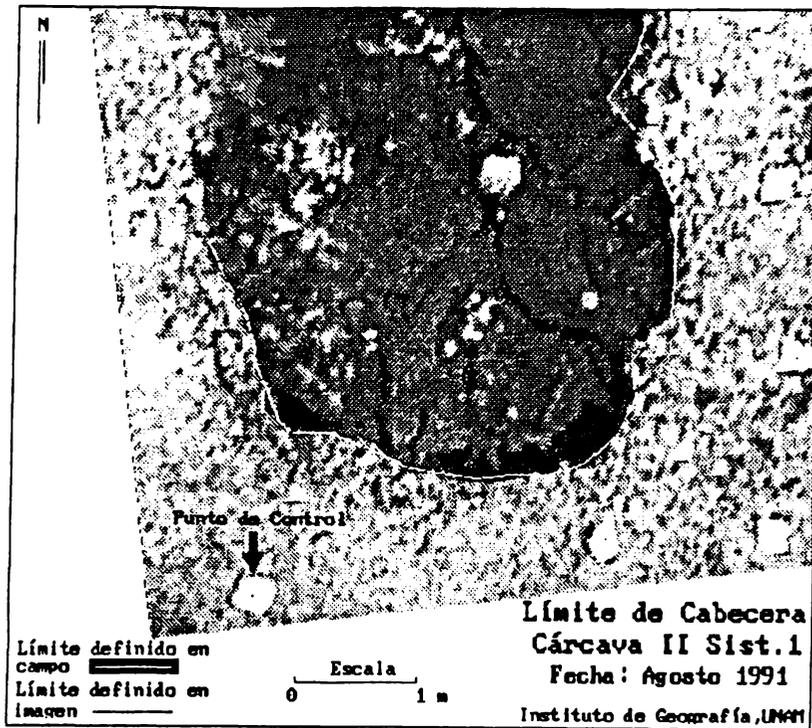


Figura 1.31 Diferencias entre los límites de la cárcava obtenidos a partir de la imagen de video con respecto a las mediciones directas a cada 30 cm. Es la misma imagen utilizada en la Fig.1.20 sólo que se ha agregado aquí el límite de la cárcava obtenido en campo. Tomada el 24 de agosto de 1991.

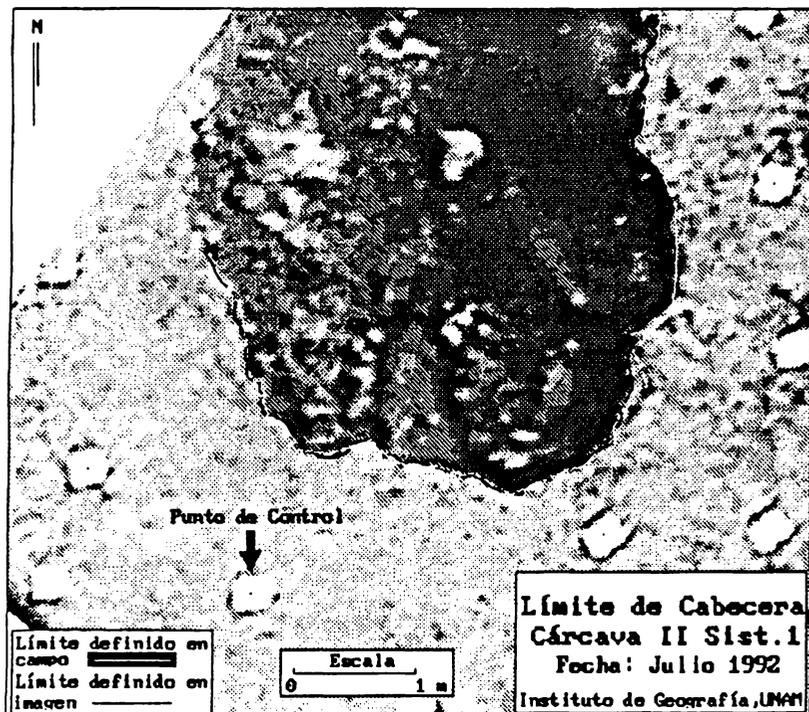


Figura 1.32 Diferencias entre los límites de la cárcava obtenidos a partir de la imagen de video con respecto a las mediciones directas en campo a cada 30 cm. Es la misma imagen utilizada en la Fig.1.21 sólo que se ha agregado aquí el límite de la cárcava obtenido en campo. Tomada el 14 de julio de 1992.

Para el caso del Sistema 2, el valor del área erosionada es más alto que en el caso del Sistema 1, aunque la superficie del área de cabecera estudiada, es mayor en este caso (40 m² aprox.) y menor el período evaluado (325 días). Si se considera de nuevo el valor del área erosionada como un porcentaje de la superficie de cabecera, entonces se encuentra un valor del 10% de pérdida de superficie de suelo de cabecera, el cual es menor pero similar, en relación a los resultados de la cárcava II del Sistema 1 (14%).

Ahora, considerando los resultados obtenidos en términos de intensidad del proceso, aunque se sabe de antemano que es una generalización de la realidad, pero da una idea de la dinámica ocurrida durante el período general evaluado. Es posible entonces calcular para la Cárcava II del Sistema 1, una velocidad particular de avance por día, durante cada uno de los períodos considerados. Para el primero corresponde con un avance de 68 cm²/día, el segundo 19 cm²/día, el tercero 16 cm²/día y el último de 33 cm²/día.

Por otro lado para tener una idea más cercana a la realidad, de la intensidad de la erosión, también deben considerarse los siguientes aspectos:

1. La dimensión en longitud y superficie de la cárcava evaluada es relativamente pequeña. El área de la cabecera en su porción estudiada es un poco mayor a los 11 m² (3.2 largo x 3.5 m ancho en promedio). Considerando el 1.5 m² de área perdida para todo el período general evaluado, resulta que un poco más del 14% del área de cabecera se perdió en el lapso considerado. Esto es, aparentemente hay una relación directa entre las áreas de cabecera estudiadas, con respecto a la pérdida de suelos que se presenta. Aunque se debe reiterar, como se ha visto en las imágenes de las cárcavas mostradas anteriormente, que el avance de la erosión en las cabeceras, no es homogéneo a todo lo largo de ellas, sino que se presenta en porciones específicas y a través, sobre todo, de procesos de remoción en masa, a raíz de la caída de "*paquetes*" de suelo.

2. Por un lado se sabe que estos procesos no son continuos en el tiempo sino que se presentan intermitentemente desencadenados sobre todo por eventos meteorológicos de altas magnitudes y/o duraciones (particularmente ciclones, ver Bocco 1990:2-3). Además de que se presume que existe mayor susceptibilidad a tales procesos en la etapa inicial de lluvias, durante las primeras tormentas, cuando el suelo presenta mayor cantidad y magnitud de las dimensiones de las grietas de desecación, causadas por la contracción de las arcillas que constituyen el suelo.

Considerando esto y tomando en cuenta lo expuesto por Vázquez-Selem (1992:51-55), en relación a sus resultados de aplicar la prueba en laboratorio de estabilidad de agregados del suelo, él reporta el efecto sorprendente del "*colapso-explósión*" de los *agregados* del suelo en la porción superior del horizonte arcilloso Bt, a causa de la hidratación de las arcillas, al pasar repentinamente (en el término de pocos segundos) de un estado de deshidratación, al de saturación de agua, esto causa una verdadera explosión y desagregación de los elementos formadores.

La prueba de laboratorio efectuada por el autor citado, se realizó con muestras de suelo de 16 puntos diferentes, dentro de la misma área considerada en este estudio de caso (Los Reyes Tepetzala, Huasca, ver Fig. 1.2). Las muestras fueron obtenidas a dos profundidades: 10 a 20 cm (Ap y AB) y 50 a 60 cm (Bt). Para el primer caso ninguna de las 16 muestras sufrió un "*colapso*" completo, en cambio para el segundo caso el 87%, de las muestras si presentó "*colapso*" completo y el 13% restante una desagregación parcial (*op.cit.*:52).

Es importante reiterar que, el efecto mencionado fue observado en múltiples ocasiones en pruebas de laboratorio. De lo anterior es posible inferir y reconocer entonces, la importancia del efecto en la desagregación del suelo, a causa de la presencia repentina de agua en el suelo, producida por las primeras tormentas en la época de lluvias. Estos resultados se han referido para sostener la argumentación de que, en las primeras tormentas de la temporada de lluvias se presentan más

frecuentemente los movimientos de partículas más intensos en el área evaluada, lo cual también ha sido demostrado en el trabajo de Palacio y Vázquez (1990).

3. Para tener una idea más real de la dimensión de los procesos, habría que tomar imágenes previas e inmediatamente posteriores a la presencia de tales meteoros y en una cantidad de sistemas de cárcavas que sean, por superficie y por tipo de erosión, estadísticamente representativas para todo el municipio.

Evidentemente estos resultados no se pueden considerar como representativos de los procesos de erosión acelerada de suelos, que se presentan en el total del municipio de Huasca, lo que se trata aquí es el de argumentar y demostrar que, mediante el método propuesto es factible, por un lado definir y cuantificar el avance en la pérdida de superficie de suelo y por otro, delimitar en una misma cárcava con suficiente detalle, las áreas más afectadas en relación a tales procesos.

Para poder tener valores representativos de la dinámica de los procesos de erosión, habría que considerar un procedimiento de muestreo que cubriera las diferentes condiciones ambientales, en las cuales se presentan tales sistemas de cárcavas, y además estratificar dicho muestreo en función de la extensión y de los distintos tipos de erosión presentes en el área de estudio, esto a partir de un inventario previo.

A partir de la revisión bibliográfica que se hizo en este trabajo, asimismo considerando las experiencias prácticas obtenidas al aplicar la metodología propuesta, fue posible generar una lista sintética de las ventajas y desventajas encontradas, al emplear el método propuesto, para realizar la obtención y el procesamiento de las imágenes de video (Videografía). Esto en relación con estudios a detalle de fenómenos muy dinámicos, tal como lo es la erosión acelerada de suelos. En la Tabla 1.18 se presenta esta lista sintética.

Por la importancia de la ventaja marcada con el número seis (6), se considera necesario hacer un comentario al respecto. Este se refiere a la posibilidad de realizar, con imágenes de video en color natural, interpretación monoscópica y visión estereoscópica, debido al alto ciclaje de 30 cuadros por segundo que realiza la cámara en la toma de las imágenes.

Se ha demostrado en gran cantidad de ocasiones la efectividad de aplicar y llevar a cabo las interpretaciones del paisaje utilizando como técnica básica la fotointerpretación estereoscópica, particularmente cuando se determinan características del relieve y su cobertura. Es evidente que tal efectividad está en relación directa con la experiencia del fotointerprete. Por otro lado y esto en relación con el uso de las imágenes obtenidas en este trabajo, es de todos conocido que, el efecto estereoscópico se genera en el cerebro a partir de la observación de dos imágenes vistas individualmente, con cada uno de los ojos y registradas desde diferentes puntos de toma.

Para demostrar la posibilidad de generar pares estereoscópicos a partir de las imágenes de video registradas, se hizo un ejercicio de edición de imágenes para conseguir esto de manera práctica. En la Figura 1.33 se presenta un par estereoscópico generado para el Sistema de Cárcavas 1. El procedimiento seguido para su obtención fue el siguiente:

1. Se hizo una búsqueda y elección de dos tomas secuenciales que tuviesen la suficiente separación de los centros de toma, como para generar un efecto estereoscópico adecuado además de haber sido tomadas a una altura semejante.
2. Se les asignaron coordenadas y después se les aplicó un proceso para la corrección geométrica e igualación del tamaño del pixel.
3. Tales imágenes se "*desplegaron*" en pantalla en la secuencia correcta y con una distancia de separación que permitiera la visión estereoscópica a simple vista en el monitor y en el papel al quedar impresa.

Tabla 1.18 Ventajas y desventajas del uso de imágenes de video en la evaluación de la erosión de suelos (erosión en cárcavas).

<p>Principales ventajas:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Disponibilidad de las imágenes, cercana al "tiempo real". 2. El éxito de las tomas puede ser evaluado después del vuelo. 3. Evaluaciones a gran detalle y cuantificación de fenómenos con alto grado de precisión. 4. Posibilidad de transferir las imágenes a formato digital para su procesamiento en computadora. 5. Bajos costos de operación. 6. Disponibilidad de interpretación monoscópica y visión estereoscópica, en color natural y/o B/N (30 cuadros/seg.). 7. Posibilidad de hacer anotaciones de campo en el sonido de la cinta. 8. Posibilidad de obtener imágenes desde baja altura, lo cual elimina la influencia de nubes. 9. Posibilidad de elegir las resoluciones temporal, espacial y espectral de las imágenes. 10. Desarrollo tecnológico constante del equipo empleado. 11. Posibilidad de uso de filtros multiespectrales. 12. Muestreo a mayor detalle, a la misma altura, a través del zoom o utilizando sistemas multicámaras.
<p>Principales desventajas (no definitivas, subsanables):</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Alto costo para obtener, en papel, copias de buena calidad. 2. Menor resolución espacial al comparar con fotografía aérea. 3. Dificultad para obtener tarjetas de transferencia de video. 4. Consumo de tiempo en el trabajo de campo topográfico. 5. Deformaciones causadas por <i>proyección central</i> en función de la distancia focal empleada.

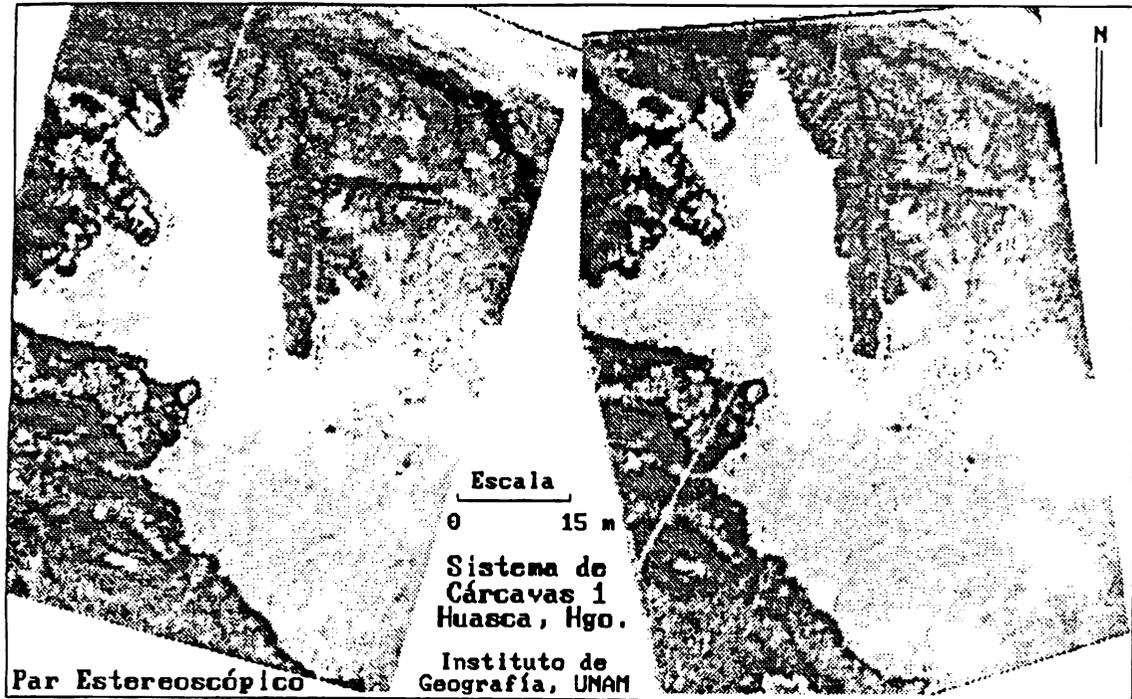


Figura 1.33 Par estereoscópico del Sistema de Cárcavas 1 generado a partir de dos imágenes secuenciales de video registradas a alturas similares. Imágenes georreferenciadas y corregidas geoméricamente.

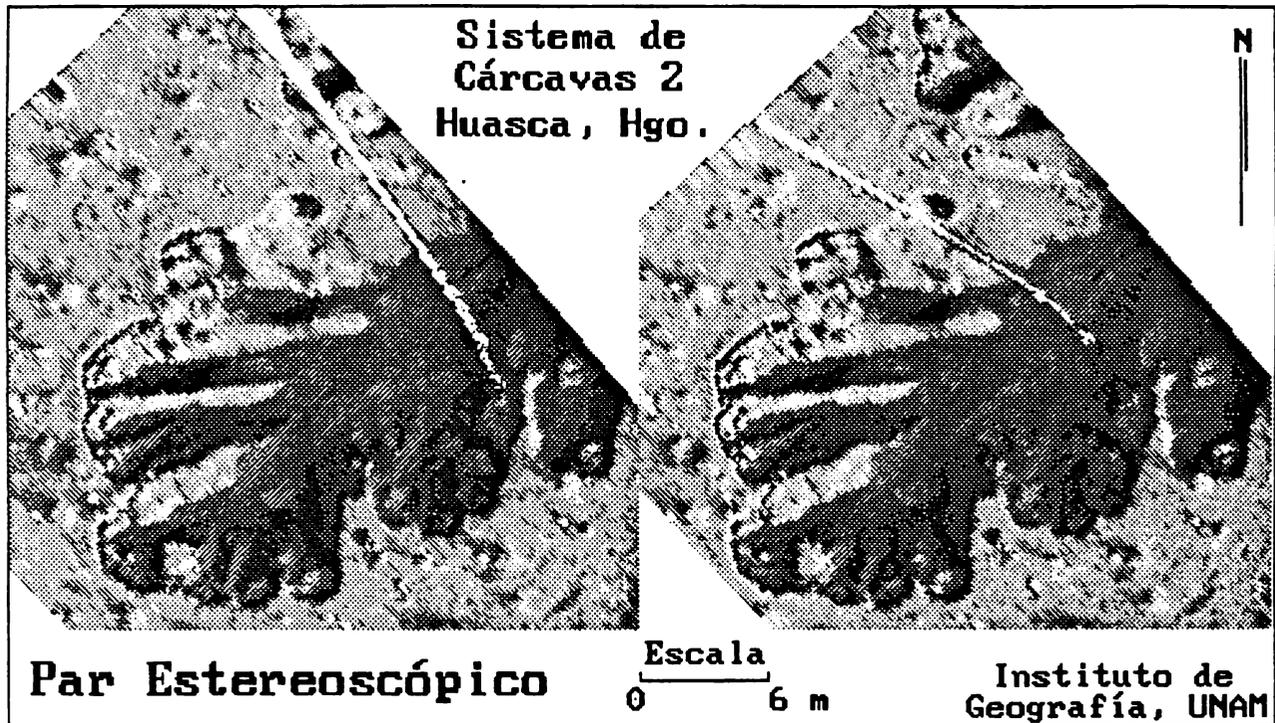


Figura 1.34 Par estereoscópico del Sistema de Cárcavas 2 generado a partir de dos imágenes secuenciales de video registradas a alturas similares. Imágenes georreferenciadas y corregidas geoméricamente.

Este mismo procedimiento se empleo para realizar el par estereoscópico del Sistema 2, el cual se muestra en la Figura 1.34.

Un aspecto importante que ya se comentó anteriormente está en relación a la ventaja marcada con el número nueve (9), particularmente en lo que se refiere a la posibilidad de elegir la resolución espacial en las imágenes obtenidas. La resolución de la información como se vio al principio de este trabajo es básica para evaluar y generar un inventario de erosión en donde los rasgos resultantes de estos procesos no tienen una amplia expresión espacial.

Para demostrar de manera práctica esta posibilidad utilizando imágenes de video se buscó en la cinta original de las tomas realizadas (para el Sistema 1 con el vuelo de julio de 1992) una serie de imágenes que tuvieran muy diferentes características de escala, desde las más detalladas, con pequeños cubrimientos del terreno, mayores tamaños de pixeles y alturas de vuelo bajas, hasta las de escalas más pequeñas pero con amplias coberturas de área, tamaños pequeños de pixeles y mayores alturas de vuelo.

Los resultados de este procedimiento se ilustran con cinco imágenes a cinco escalas diferentes en las Figuras 1.35a a 1.35e. La imagen con la cual se generó la Figura 1.35a fue tomada desde 13.5 m de altura, cubriendo una área de 31 m² y su tamaño de pixel resultante es de 1 cm. La imagen de la Figura 1.35b fue tomada desde 21 m, cubre una área de 73 m² y su tamaño de pixel es de 1.5 cm. Para la imagen de la Figura 1.35c la altura de vuelo fue de 57 m, cubre una área de 539 m² y el pixel es de 4 cm. Para la imagen de la Figura 1.35d la altura de vuelo fue de 106 m, cubre una área de 1881 m² y tiene un pixel de 8 cm. Finalmente, para la imagen de la Figura 1.35e, la cual se obtuvo desde la mayor altura de vuelo conseguida en este trabajo y fue de 198 m, cubre una área de 6570 m² y un tamaño de pixel de 15 cm.

Estos resultados demuestran la posibilidad de obtener información con el grado de detalle necesario para los objetivos específicos dependiendo de las características de los rasgos a evaluar.

En relación con la desventaja marcada con el número uno se puede decir que en la actualidad existen medios de obtener copias de muy buena calidad en papel, ya sea utilizando impresoras en color y en laser color, las cuales tienen muy alta definición y una gama amplia en tonalidades, equipo de transferencia directa de imágenes a película fotográfica convencional, graficadores electrostáticos o bien equipos de impresión directa en papel fotográfico. Aunque se debe aceptar también que el costo del equipo mencionado puede llegar a ser considerablemente alto.

Es importante tomar en cuenta que tal vez la mayor desventaja que tiene el sistema videográfico de percepción remota es la baja resolución que proporciona una señal grabada de video reproducida desde un videocasete, es decir esta baja resolución es causada por la manera en cómo se genera y reproduce una señal de video estándar a partir del barrido en el monitor de salida de una señal a cada 1/30 de segundo con una resolución en líneas de barrido de 240 aprox.

Si se considera la comparación hecha por Meisner y Lindstrom (1985:559), entre la resolución de las imágenes de video (240 líneas en pantalla) con respecto a la resolución dada por las transparencias fotográficas estándares (diapositivas), con formato de 35 mm, las cuales pueden dar 20 líneas/mm (720 líneas en el lado más largo del formato mencionado), esa diferencia daría una relación de resolución parecida a la que resulta de comparar la fotografía aérea de formato grande 23 x 23 cm, la cual puede tener resoluciones de 80 líneas/mm con respecto a las 20 mencionadas de las diapositivas. Esto es, la diferencia es muy considerable en los dos casos.

Esto permite concluir que mientras no se mejore en detalle la manera de guardar la información de las imágenes (señal de video) en un videocasete, la desventaja en grado de detalle seguirá a pesar de obtenerlas con videosensores de mayor resolución (CCD).

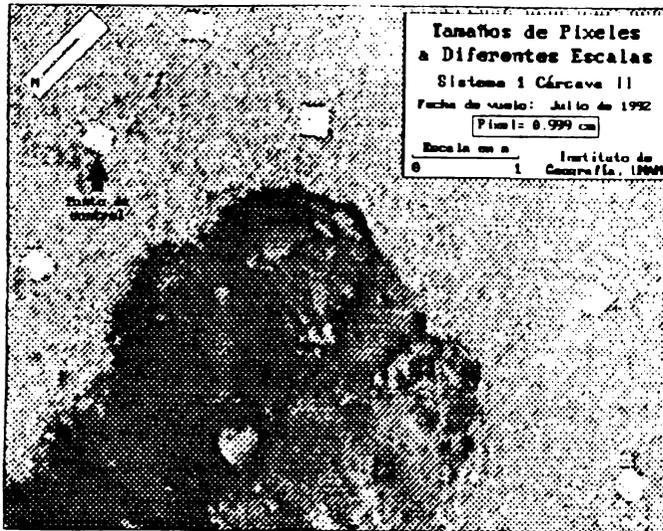


Figura 1.35a Diferentes resoluciones espaciales de las imágenes. Tomada desde 14 m, cubre 31 m², tamaño de celda 1 cm.



Figura 1.35b Diferentes resoluciones espaciales de las imágenes. Tomada desde 21 m, cubre 73 m², tamaño de celda 1.5 cm.



Figura 1.35c Diferentes resoluciones espaciales de las imágenes. Tomada desde 57 m, cubre 539 m², tamaño de celda 4 cm.

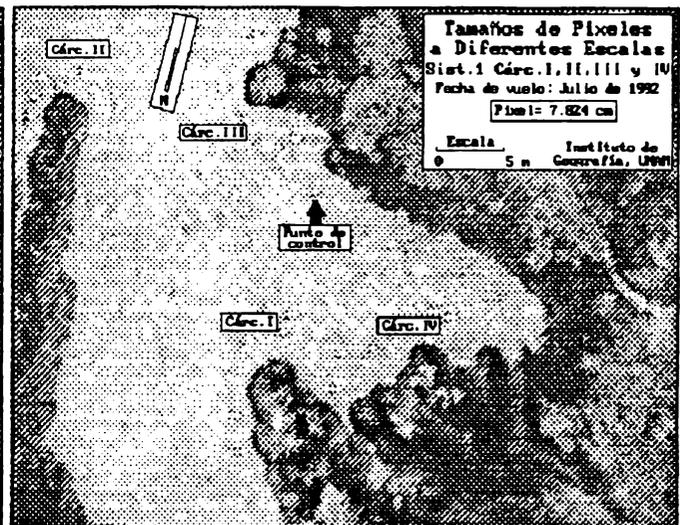


Figura 1.35d Diferentes resoluciones espaciales de las imágenes. Tomada desde 106 m, cubre 1881 m², tamaño de celda 8 cm.

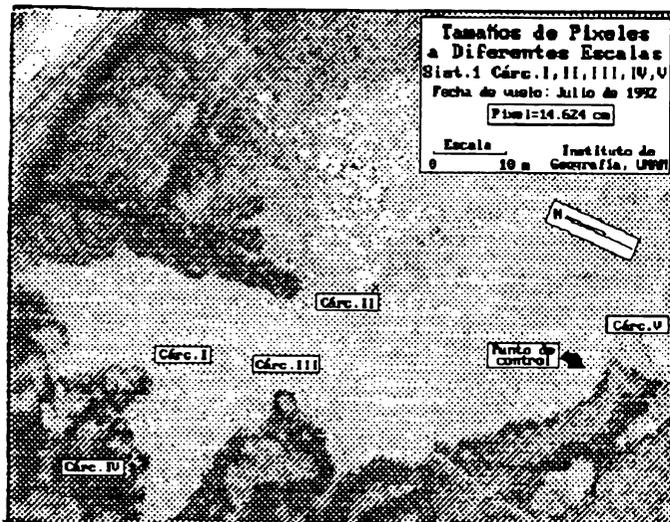


Figura 1.35e Diferentes resoluciones espaciales de las imágenes. Tomada desde 198 m, cubre 6570 m², tamaño de celda 15 cm.

Respecto a esto mismo y con relación a la desventaja marcada con el número dos, se puede decir que existe en la actualidad un desarrollo tecnológico acelerado, en relación al mejoramiento de las cámaras de video convencionales, ya que ahora es posible usar cámaras que tienen instalados tres convertidores de energía luminosa a carga eléctrica, conocidos como *CCD (Couple Charge Devices)*, uno para cada color primario (RGB) con más de 420,000 elementos o sensores (píxeles). Esto les da a las imágenes una resolución que se acerca más a las imágenes obtenidas con cámaras fotográficas convencionales (Rood, 1993:80-81).

Ahora es posible contar con convertidores o *CCD* de altísimas resoluciones, tal es el caso del producido en serie por la Compañía Dalsa (Munier-Lee, 1993:10). Este *CCD* posee más de 26 millones de elementos fotodetectores o sensores activos (píxeles), en una superficie de 40.3 cm² (2 ½ por 2 ½ pulgadas), esto permite tener resoluciones tanto o más altas que en la fotografía convencional.

Con respecto a la desventaja número tres, se puede decir que conforme pasa el tiempo, cada vez es más fácil disponer de tarjetas de transferencia o digitización de video, debido a la reducción del costo de adquisición y a su presencia más común en los centros de distribución de artículos de computación.

1.12 CONCLUSIONES

Las conclusiones en este trabajo se pueden mencionar desde dos diferentes puntos de vista, primero las que se relacionan con los aspectos puramente tecnológicos de la metodología que se ha empleado, y segundo, los relacionados con los aspectos que incluyen las intensidades y características de los procesos erosivos involucrados en el fenómeno estudiado. Algunas conclusiones sobre el aporte del SIG empleado en este estudio de caso, se han incluido en las conclusiones generales, al final de esta tesis.

Una de las primeras conclusiones a las que se llegó en este estudio, es acerca de las resoluciones espaciales alcanzadas empleando imágenes de video, ellas fueron a suficiente detalle como para su empleo en la cuantificación del desarrollo de las formas de erosión acelerada mencionadas. Considérese que los tamaños de los píxeles resultantes, para las imágenes que fueron corregidas, estuvieron entre 1 hasta 5 cm.

La exactitud alcanzada con el método propuesto en este trabajo, superó la alcanzada con el método *tradicional*, a partir de las mediciones directas hechas en campo, en el cual a pesar de haberse obtenido medidas con cinta a cada 30 cm alrededor de la cabecera (con tres líneas de referencia en las dos márgenes y una tercera transversal en la cabecera), se presentaron pérdidas de detalles en la configuración de los bordes; asimismo existieron diferencias considerables en las cuantificaciones de superficies. Esto es, hubo una sobrestimación con un valor del 10% en promedio, en los valores de superficie de avance de la erosión del suelo.

Estos resultados demuestran la posibilidad de obtener información con el grado de detalle necesario para los objetivos específicos dependiendo de las características de los rasgos a evaluar. Mediante el método propuesto, es factible por un lado definir y cuantificar la superficie erosionada de suelo y por otro delimitar en una misma cárcava, con suficiente detalle, las áreas más dinámicas. Los procesos de erosión en los dos sistemas evaluados presentaron cambios en las tasas de avance, en función del lapso considerado y de la etapa del año en que fueron tomadas las imágenes.

La diferencias obtenidas entre los métodos considerados permiten concluir que, la mejor alternativa es la realizada con videografía digital, debido sobre todo al grado de detalle que se tiene, a las exactitudes alcanzadas y a la posibilidad de aprovechar más ampliamente la

información gráfica digital del terreno.

Las conclusiones definidas en relación a las intensidades y características de los procesos erosivos involucrados en el fenómeno estudiado se pueden resumir de la siguiente manera:

1. Los procesos de erosión acelerada de suelos en los dos sistemas evaluados presentaron cambios en las tasas de avance, en función del lapso considerado y de la etapa del año en que fueron tomadas las imágenes (temporada de lluvias/secas).
2. La mayor cantidad de pérdida de superficie de suelo, de los dos sistemas evaluados, se dio en proporción (% de superficie del área de cabecera), aunque no en valor absoluto, en la cárcava II del sistema 1, aún cuando para el Sistema de Cárcavas 2 sólo fueron consideradas tres fechas, las cuales cubrieron un lapso menor.
3. Las diferencias encontradas al considerar los métodos de medición directa en campo del avance de la erosión, con respecto a las evaluaciones hechas en las imágenes de video, permiten concluir que: la mejor alternativa de las dos mencionadas, es la realizada con videografía digital, debido sobre todo al grado de detalle que se tiene, a la precisión alcanzada y por que además es posible aprovechar más ampliamente la información gráfica digital del terreno, la cual puede ser interpretada visualmente. En cambio el método de medición directa, sólo ofrece información limitada a datos puntuales.
4. Como se observó en las imágenes los procesos de erosión acelerada no se presentan homogéneamente en toda la cabecera, debido sobre todo, a la forma en como más frecuentemente se evidencian estos procesos, a partir principalmente de la caída de *paquetes* de suelo, por lo tanto existen porciones de la cabecera que en algún momento presentan mayor actividad que en otros, aunque la tendencia general del avance, hace que se presente mayor dinámica en el extremo superior del eje longitudinal de la cárcava.

En este trabajo se concluye que, la disciplina videográfica es una alternativa real para obtener información de los rasgos del terreno con gran amplitud de detalle, con un bajo costo de obtención y disponibilidad inmediata de la información. Además con esta metodología es posible tener una amplia resolución temporal, la cual permite caracterizar la dinámica de los fenómenos estudiados. En relación a la resolución espectral, se mencionaron diversos trabajos en los cuales se ha hecho uso de filtros espectrales de *bandas angostas* adaptados a las cámaras de video.

En este trabajo se han considerado las principales ventajas y desventajas inherentes a la aplicación de la videografía como un caso especial de percepción remota o teledetección. La principal desventaja del uso de las imágenes de video digitizadas, está en la menor resolución espacial, al ser comparadas en igualdad de condiciones, con respecto a la fotografía aérea convencional.

Una desventaja importante podría ser la extensión del terreno a cubrir en relación a la necesidad de poseer registros con imágenes de video de grandes áreas, es decir cubrimiento a detalle en un nivel regional, sería forzoso hacer consideraciones diferentes en cuanto costos y logística para la realización de los levantamientos videográficos correspondientes.

Las posibilidades de aplicación de las imágenes de video, para hacer evaluaciones del terreno, son amplias, y están abiertas para ser utilizadas por diversas disciplinas, desde las relacionadas con aspectos específicos de la cobertura del terreno: determinación de tipos de vegetación, condiciones de cultivos, evaluaciones forestales, determinación de las propiedades de los suelos, caracterización del relieve, etc., así como en las disciplinas que integran diversos aspectos del paisaje: deterioro de los recursos, impactos ambientales negativos, delimitación de áreas afectadas por contaminantes externos, cambios en la dinámica litoral, etc.

Los límites de aplicación de esta disciplina están dados por los conocimientos y la experiencia, la imaginación y el ingenio de los usuarios, y sobre todo en la posibilidad de adaptar esta metodología para los fines particulares de los estudios por realizar.



BIBLIOTECA
DR. JORGE A. VIVO

ESTUDIO DE CASO 2

Evaluación de cambios en el uso agrícola y forestal del suelo en el contexto de un sistema de información geográfica: El caso de la Cuenca Alta del Río Temascaltepec, Nevado de Toluca.

RESUMEN

Por medio de la aplicación de un sistema de información geográfica (SIG) se obtuvieron las características morfológicas y de distribución de las áreas en uso agrícola y forestal además de una evaluación del cambio en el uso del suelo en la Cuenca Alta del Río Temascaltepec, laderas oeste y suroeste del Nevado de Toluca. En una primera parte se consideraron las variables altitud y pendiente, en relación a las áreas de uso agrícola y sus dimensiones de superficie. También en esta parte se consideró el porcentaje de superficie con cobertura de bosque para cada uno de los predios considerados oficialmente por la SARH, como de uso *forestal*. En una segunda parte se realizó una evaluación del cambio de uso del suelo para el periodo entre 1972 y 1988.

Los resultados de la primera parte muestran que, para la superficie total de la cuenca en 1972, había un 72.7% de bosque, agricultura 20.4% y 4.9% de pastizal. Para 1988 hubo un 69.3% de bosque, 25.1% agricultura y 4.1% de pastizal. Existe una concentración de las frecuencias de las áreas agrícolas en el rango altitudinal de los 2,000 a los 3,000 msnm. La mayoría de las áreas forestales que se encuentran en el intervalo altitudinal mencionado, presentan menos del 60% de cobertura de bosque. Las pendientes medias dominantes de las superficies usadas para producción agrícola es de 11° y los valores límites van de 5° a 11°.

Los resultados de la segunda parte muestran que en principio existe una diferencia de uso del suelo de cualquier tipo en un 16.5% del total del área de la cuenca, esto es, el 84.5% del área permaneció con el mismo uso en el lapso mencionado. Dentro de los cambios específicos de uso del suelo se presentaron los siguientes: Bosque a agricultura un 37.4% de las diferencias totales, Bosque a Pastizal 15.4%, Agricultura a Bosque 17.2%, Pastizal a Bosque 12.6%, Pastizal a Agricultura 9.2%, etc. Algunos de estos cambios se explican en primera instancia por la forma típica de apropiación y ampliación de la frontera agrícola y pecuaria en relación al incremento de habitantes y a la reducción de la capacidad del suelo para la producción agrícola por la degradación del mismo.

2.1 INTRODUCCION

Los sistemas intertropicales de montaña se caracterizan por tener condiciones físicas y biológicas particulares, diferenciadas de los ecosistemas no montañosos de esas mismas zonas climáticas o bien montañosos pero de diferentes zonas climáticas. La característica más común a tomar en cuenta, para el entendimiento de tales sistemas son sus grandes variaciones en los valores altitudinales, en extensiones longitudinales cortas. Este hecho implica que se presenten cambios drásticos en las condiciones de temperatura, y una marcada estratificación o gradación de climas en un espacio pequeño, frecuentemente desde los cálidos tropicales hasta los templados y fríos.

En estas zonas es posible identificar importantes problemáticas relacionadas con los aspectos ecológicos y de manejo de los recursos. Por un lado, a la presencia de una gran diversidad de hábitats y de comunidades bióticas, y por otro, desde la perspectiva del manejo de los recursos, a la sobreexplotación de los bosques, a la apertura no controlada de áreas para pastoreo y al uso del

fuego como medio para abrir nuevas áreas agrícolas y ganaderas, desencadenamiento de la erosión acelerada de suelos, etc. Estas son algunas de las perturbaciones más importantes que se presentan en dichos sistemas.

En este sentido surge la necesidad de plantear un estudio sobre el uso y manejo del suelo en las zonas montañas de México y de cuáles son sus posibles impactos sobre los sistemas bióticos (Villers-Ruiz, 1991; Villers-Ruiz y López-Blanco, 1992). Para ejemplificar esto se ha tomado el caso de la Cuenca Alta del Río Temascaltepec (359.6 km²), en el Volcán Nevado de Toluca, sobre la base del conocimiento de algunos aspectos físicos y de vegetación, así como en relación a los aprovechamientos forestal, agrícola y pecuario.

La importancia de la Cuenca del Río Temascaltepec radica en gran parte, en el aporte hidráulico que se extrae de sus corrientes y acuíferos para el sistema Cutzamala, la cual, junto con otros sistemas externos a la cuenca "*exportan*" agua a la Ciudad de México; el uso del suelo, repercute tanto en la posibilidad del uso sostenible y equilibrado de los recursos locales, como en la importante función de recarga de acuíferos de los sistemas regionales.

2.2 ANTECEDENTES

Dentro de los estudios antecedentes más relevantes que han sido reportados para el Nevado de Toluca, se pueden mencionar los siguientes: Sobre aspectos de vegetación y florísticos para la zona alpina, es decir por encima de los 4,000 msnm, están los reportados por Villalpando (1968) y González-Trápaga (1986). En relación a los estudios de suelos, se encuentran los trabajos de Navarro (1976) referente a suelos derivados de cenizas volcánicas, así como el de Grajales *et.al.*(1986) en el cual se presenta una clasificación detallada de los andosoles por pisos pedoclimáticos.

Sobre el uso del suelo y vegetación en el área del Parque Nacional Nevado de Toluca (cuyo límite está dado a partir de la cota de los 3,000 msnm), está el trabajo de Sandoval (1987), en el cual presenta un diagnóstico general sobre el estado de conservación del área mencionada. Finalmente en el trabajo de Méndez (1991) se realizó una evaluación físico ambiental aplicado a aspectos forestales para toda la Cuenca del Río Temascaltepec.

2.2.1. Objetivos.

El objetivo más general del programa que se desarrolla en el Instituto de Geografía de la UNAM sobre el cual se centra este estudio de caso es: evaluar el uso del suelo y el manejo de los recursos naturales en las zonas montañas del Sistema Volcánico Transversal y su impacto sobre los sistemas bióticos.

El objetivo de este trabajo es: realizar una evaluación del uso agrícola y forestal del suelo en la Cuenca Alta del Río Temascaltepec, Nevado de Toluca, considerando para ello las variables altitud, pendiente y tamaño de las superficies de áreas agrícolas y forestales, haciendo además el seguimiento a los cambios en dichos usos, de acuerdo a la información multitemporal para los años 1972 y 1988, realizando el procesamiento y análisis de la información, dentro del contexto de un Sistema de Información Geográfica (SIG).

2.2.2. Hipótesis.

Existe un uso agrícola y forestal del suelo diferenciado, el cual está influenciado de manera

importante de acuerdo a dos parámetros relacionados con la morfometría de las vertientes: intervalos altitudinales y pendiente. Los cambios en los diferentes usos del suelo es posible evaluarlos utilizando la información multitemporal disponible: Cartográfico temática (1972) y de fotomapas (1988, con su base de datos tabular respectiva). La tendencia en los cambios de uso del suelo en el área de estudio para las dos últimas décadas (de 1972 a 1988), corresponden a una reducción de las áreas forestales y a un aumento de las áreas con aprovechamiento agrícola y para inducción de pastizales.

2.2.3. Descripción de las características del área en estudio.

La Cuenca Alta del Río Temascaltepec se localiza sobre las laderas oeste y suroeste del Nevado de Toluca (ver Figura 2.1). Este volcán se localiza en la porción media del Sistema Volcánico Transmexicano, el cual se caracteriza por ser, en general, un conjunto de sierras de origen volcánico de edad pliocuaternaria, alineadas aproximadamente en sentido este a oeste desde el Golfo de México hasta el Océano Pacífico y entre los 18°00' y 22°00' de latitud norte (Demant 1978 y 1981). Tiene una extensión de 359.6 km² la cual corresponde a menos del 1% del área total del Estado de México (21,355 km²).

En la cuenca se presentan diversos intervalos altitudinales que van de los 1,700 hasta los 4,680 msnm (Figura 2.2). Tales gradientes generan una diversidad amplia de condiciones ambientales diferenciadas, sobre todo en relación a tipos de vegetación y climas. Debido a esos cambios altitudinales en espacios cortos en la cuenca, existen una variedad notable en tipos de clima, los cuales han sido establecidos y descritos en la cartografía consultada. Considerándolos en sentido descendente en cuanto a altitudes están los siguientes:

1. Grupo de climas fríos **ETw**, frío con temperatura media anual (TMA) entre -2° y 5°C y con régimen de lluvias de verano. Su extensión dentro de la cuenca es mínima, sólo se localiza en las porciones más altas del volcán, aproximadamente a partir de la cota de los 4,000 msnm hasta la cresta del cráter.

2. Grupo de Climas Templados: Subgrupo Semifríos **C(w2)b'**, con TMA entre 5° y 12°C. Es el más húmedo de este subgrupo, presenta verano fresco y largo, y lluvias de verano. Es el segundo tipo de clima que cubre mayor extensión en la cuenca (después del subgrupo de los Templados), cubre porciones norte y noreste de la cuenca, desde la cota 3,300 msnm hasta aproximadamente los 4,000.

3. Grupo de Climas Templados: Subgrupo Templado **C(w2)w**, con TMA entre 12° y 18°C. Es el más húmedo de los templados subhúmedos, con lluvias de verano. Cubre la mayor extensión dentro de la cuenca, desde cerca de su salida, en la localidad de Temascaltepec hasta la porción inferior de las laderas montañosas del Nevado, va desde los 2,000 hasta los 3,300 msnm aprox.

4. Grupo de Climas Templados: Subgrupo de Climas Semicálidos **(A)C(w2)(w)**. Es el más cálido de los templados **C**, con TMA mayor a 18°C, es el más húmedo de este subgrupo, con lluvias de verano. Su extensión en el área de estudio se restringe solamente a una pequeña área en la salida de la cuenca, comprendiendo parcialmente la superficie de asentamientos de la localidad de Temascaltepec, México.

En relación a la precipitación pluvial anual promedio, la mayor extensión de la cuenca está en el intervalo de los 1,200 a 1,500 mm. Sólo en la porción este de la cuenca, hacia el suroeste del Nevado existen valores de más de 1,500 mm (INEGI, Carta de Hidrología Superficial, 1:250,000, 1983).

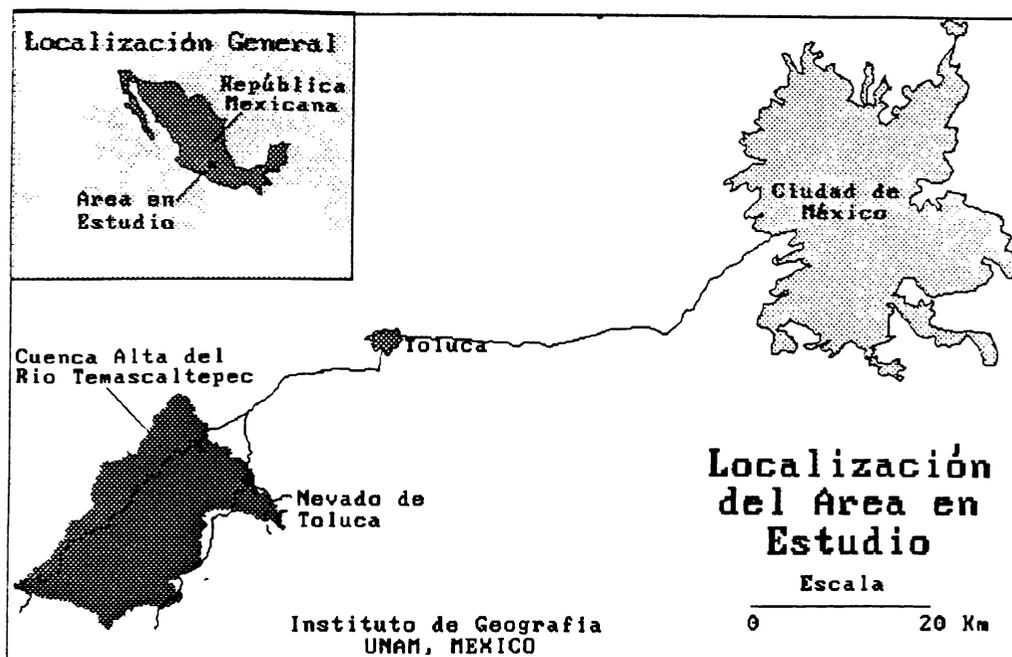


Figura 2.1 Mapa de localización del área en estudio, Cuenca Alta del Río Temascaltepec, Nevado de Toluca.

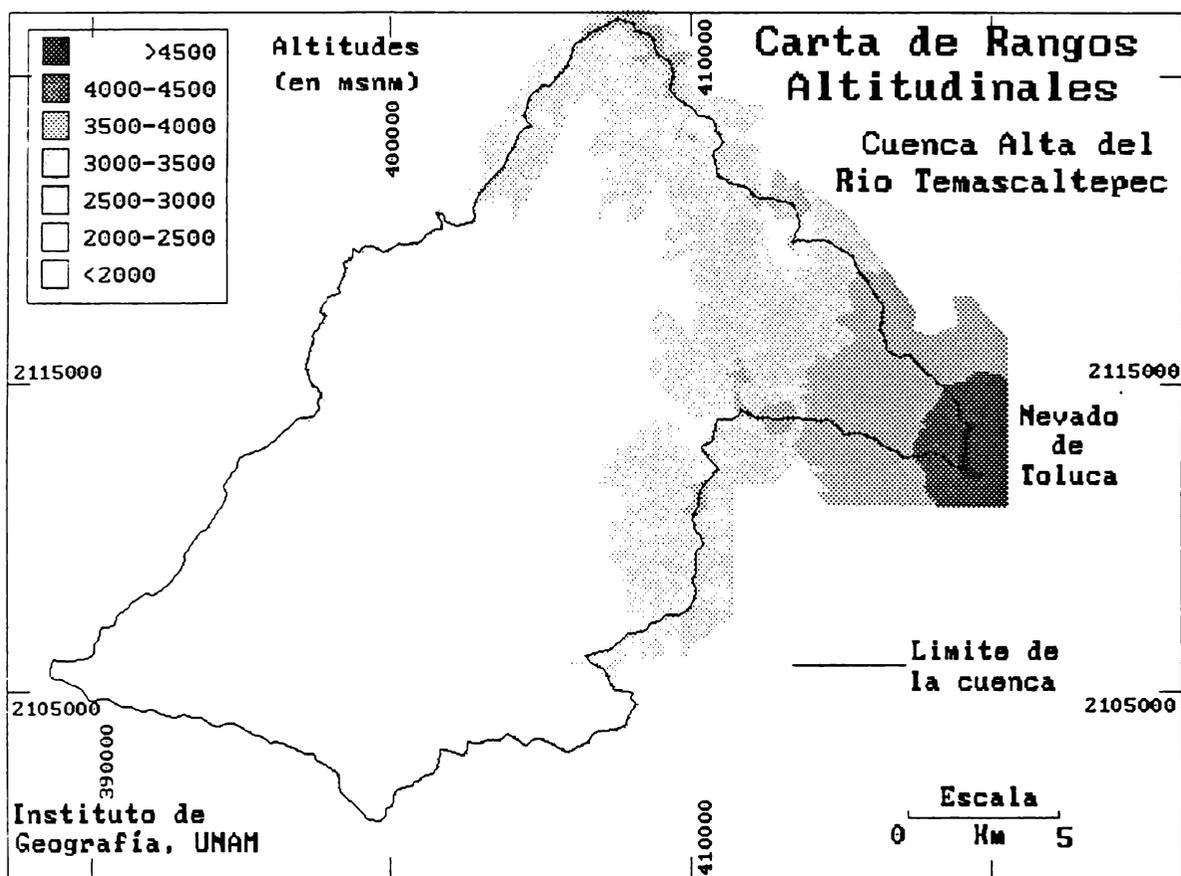


Figura 2.2 Mapa de Intervalos de Altitudinales en la Cuenca Alta del Río Temascaltepec, Nevado de Toluca. Los intervalos con mayor porcentaje de cubrimiento es el de 2,000 a 2,500 msnm (25%), el 40% entre los 2,500 a 3,000 y el 23% entre los 3,000 a 3,500 msnm.

La Cuenca Alta del Temascaltepec se localiza en la Región Hidrológica No. 18, específicamente en la porción que la SARH (1971) la ha denominado como Cuenca del Medio y Bajo Balsas. La secuencia de cauces principales que desde el Nevado de Toluca van confluyendo para formar la cuenca del Río Balsas, son sucesivamente: Río Verde (en el área de estudio), Temascaltepec, Tilostoc, Cutzamala y Balsas (SARH, 1971). El cauce principal dentro de la cuenca de estudio es El Río Verde, cuya cabecera está en la parte más alta del Nevado, en las laderas noroeste, formado originalmente este río por los arroyos afluentes La Hortaliza y Pichontaguii. Después recibe el nombre de la Comunidad, justo después del poblado del mismo nombre, en la porción central de la cuenca.

Muy cerca de la localidad de Temascaltepec, el Río Verde recibe por su margen izquierda, las aguas del afluente Río El Vado. A partir de la localidad mencionada el río toma su nombre hasta su confluencia con el Río Tilostoc, cerca de la planta hidroeléctrica Tingambato, aguas abajo y fuera del área de estudio. Dentro de la cuenca se han instalado tres estaciones hidrométricas, en dos de ellas se realizan mediciones continuas en la actualidad (A-11 Real de Arriba (DDF) y A-12 La Comunidad (DDF)). En cambio la tercera (Río Verde, CFE) fue suspendida en el año de 1959 (SARH, 1971). Los valores medios de escurrimiento total anual, registrados para las estaciones mencionadas, van de 54.2 millones de m³ hasta los 70.9 millones de m³ (ver Cuadro 2.1). Aunque ninguna de las estaciones hidrométricas se encuentra en la salida de la cuenca estudiada, los datos que se incluyen en el cuadro mencionado pueden dar idea de la magnitud del gasto medio, aún cuando sólo sea para una cierta porción en el interior de la cuenca.

Cuadro 2.1 Características generales de las estaciones hidrométricas ubicadas en el interior de la cuenca en estudio.

Estación	Dependencia	Área km ²	Corriente	Gasto Medio, Mill.m ³	Período	Gasto Máximo m ³ /seg	Gasto Mínimo m ³ /seg
A-11 Real de Arriba	(DDF)	113	Río Vado	70.891 (14.1)	1958-70	98.2 05/08/63	0.110 03/05/58
A-12 La Comunidad	(DDF)	122	Río Verde	54.213 (15.3)	1959-70	43.8 24/06/70	0.426 15/05/69
Río Verde	(CFE)	213	Río Verde	57.308 (12.8)	1941-59 Suspend	150.0 26/08/57	0.430 18/06/46

FUENTE: BOLETIN HIDROLOGICO NO.49, TOMO III, SARH, 1971.

Los aspectos litológicos de la cuenca se caracterizan por una influencia amplia ocasionada por la cobertura de materiales piroclásticos, depositados a raíz de las sucesivas erupciones volcánicas del Nevado de Toluca, sucedidas sobre todo durante los últimos 40,000 años. En este período, de acuerdo a lo reportado por Bloomfield y Valastro (1974), Bloomfield (1977) y por algunas nuevas consideraciones respecto al tipo de erupciones detectadas por Aceves (1994) y otros autores, es posible concluir que se presentaron cuando menos dos erupciones con nubes peleanas, las cuales cubren gran parte de las laderas del volcán (*op.cit.*:7).

Aceves (1994) ha planteado la posibilidad que más que depósitos de caída (lluvia de cenizas y

pomez) de erupciones vulcanianas, se trata de depósitos de nubes ardientes y lahares. Robin (1981) citado por Aceves (1994), habla de cuando menos dos episodios de tipo peleano. Las nubes peleanas se originaron en un lapso aproximado hace entre 38,000 a 28,000 años. Estos depósitos se hallan cubiertos por materiales de caída libre y morrenas (*op.cit.*:7). Este autor menciona que a pesar de que Bloomfield definió algunas estructuras como *lahares líticos azul-grisáceos*, aparentemente hay evidencias de altas temperaturas en el depósito de los materiales localizados en la ladera sur del volcán, los cuales pueden ser clasificados como de nube ardiente.

Con respecto a las características morfométricas del relieve en el área en estudio, se pueden considerar los siguientes valores para tener una idea de su heterogeneidad relativa a tales parámetros:

Los intervalos de altitudes dominantes en la cuenca son: El 25% del total del área de la cuenca está entre los 2,000 y 2,500 msnm, el 40% entre los 2,500 y 3,000, el 23% entre los 3,000 y 3,500 msnm. Solamente el 6% se encuentra en altitudes mayores a los 3,500 msnm (ver Figura 2.2).

En relación a la inclinación de las laderas, el intervalo dominante es el de los 4° a 8° con un 19% del total, estos valores caracterizan algunos sectores de las planicies aluviales, los piedemontes y las superficies cumbresales de los flujos lávicos cubiertos por piroclastos. Enseguida está el de los 8° a 12° con un 16%, posteriormente está el de 12° a 16° con un 14%. Sólomente menos del 4% de la cuenca tiene pendientes mayores a 35°, concentrándose éstas en las laderas más inclinadas del Nevado de Toluca, así como de los conos volcánicos aislados, en las porciones norte y centro (ver Figura B.3 anexada en el Apéndice B).

Con respecto a los valores azimutales de la orientación o exposición de las laderas (aspecto), no existe un intervalo claramente dominante, los que más se destacan son en el caso de exposición hacia el oeste (18%), al suroeste (17%) y al noroeste (17%, ver Figura B.4 en el Apéndice B).

Los tipos de suelos de mayor cobertura en el área de estudio y de acuerdo a la clasificación de FAO son, en primer lugar los andosoles húmicos, localizados en las laderas volcánicas alrededor del Nevado, en el norte y noreste de la cuenca. Enseguida los cambisoles crómicos y feozem háplico en la porción baja de la cuenca. En áreas pequeñas se localizan sitios con litosoles, sobre todo en las laderas del Nevado y en las paredes de los barrancos de mayor desarrollo. Al este de Temascaltepec existen algunas áreas con luvisoles crómicos, las cuales presentan el mayor grado de degradación del suelo, principalmente por procesos de erosión acelerada, teniendo como formas resultantes algunos sistemas de cárcavas amplios. Particularmente en las laderas más inclinadas del Nevado de Toluca existen regosoles eútricos, en las porciones superiores a los 4,200 msnm (INEGI, Carta Edafológica, 1:50,000, 1976).

Las unidades geomorfológico-morfogenéticas más representativas de la cuenca son:

1. Superficies cumbresales y escarpes de flujos lávicos basálticos del cuaternario,
2. Laderas montañosas de volcán poligenético del cuaternario formadas por flujos andesíticos y dacíticos, con diversas etapas eruptivas sucesivas (Nevado de Toluca),
3. Conos volcánicos de coladas de lava basáltica y andesíticas del cuaternario,
4. Superficies cumbresales de flujos lávicos andesíticos y dacíticos del terciario, cubiertas de piroclastos del cuaternario (de flujo y caída),
5. Planicies aluviales formadas por depósitos cuaternarios,
6. Pequeñas planicies originalmente lacustres y posteriormente aluviales, formadas por el cierre del

drenaje fluvial, ocasionado por los flujos lávicos de diversos orígenes.

Las condiciones generales del relieve se pueden observar en el mapa de relieve sombreado, generado a partir de la aplicación de *filtros de convolución lineal* al modelo digital del terreno (MDT), el cual fue a su vez originado, por la interpolación y *rasterización* de las curvas de nivel digitizadas, de la cartografía topográfica 1:50,000 (ver Figuras B.1 y B.2 del Apéndice B).

En cuanto a las comunidades de vegetación, existe desde zacatonal alpino (en el intervalo de 4,000 a 4,500 msnm), bosques de *Abies religiosa*, *Pinus spp.*, hasta asociaciones de *Quercus* y latifoliadas, estas últimas sobre la parte más baja de la cuenca, abajo de los 2,000 msnm (ver Tabla 2.1 y Foto 2.1).

Tabla 2.1 Asociaciones de vegetación correspondientes a intervalos altitudinales.

INTERVALO ALTITUDINAL	PRINCIPALES ASOCIACIONES DE VEGETACION
<2000	QUERCUS CON LATIFOLIADAS
2000-2500	PINUS CON QUERCUS
2500-3000	PINUS CON ALNUS
3000-3500	ABIES CON PINUS
3500-4000	PINUS HARTWEGII
4000-4500	AGROSTIS CON CALAMAGROSTIS
>4500	SIN VEGETACION

En una síntesis del proyecto de reforestación Nevado de Toluca realizado por PROTIMBOS en 1972, se establece que un 77% del área que fue estudiada (48,571 has.) es forestal, de ésta más de la mitad se caracteriza por tener bosques poco densos, talados y mezclados con zonas agrícolas y ganaderas.

González-Trápaga (1986) realizó un estudio detallado de vegetación alpina (páramo del Nevado de Toluca a partir de la cota de los 4,000 m), aplicando modificaciones a la metodología de Zurich-Montpellier, la cual está basada en la descripción florística de la vegetación mediante el empleo de levantamientos de inventarios florísticos en perfiles o transectos (*op.cit.*:22).

Una de las principales conclusiones a la que llega el autor mencionado, fuera de los aspectos sobre composiciones florísticas, es que, aún cuando el factor altitudinal es el primordial en la distribución actual de las asociaciones *zonales*, el método que emplearon les permitió inferir que existen otros componentes del medio físico, como las características de las laderas, algunos aspectos climáticos y los tipos de suelos, que influyen en la disposición de las asociaciones y subasociaciones, tanto *zonales* como *azonales* de vegetación *natural* (*op.cit.*:53).

Este autor concluye que la perturbación de las comunidades de vegetación del páramo, debido a la presencia continua de incendios para la inducción de brotes de pasto palatable para el ganado, han modificado sustancialmente las condiciones *naturales* que prevalecían para las primeras décadas de este siglo.

En el área de estudio se han detectado diversos efectos causados y desencadenados por actividades antrópicas.

Foto 2.1 En esta imagen se muestra claramente el límite entre el zacatonal alpino (páramo de altura de acuerdo a INEGI) y el bosque de *Pinus hartwegii*, a 4,040 msnm, en la ladera noroeste del Nevado de Toluca.



Foto 2.2 Un aspecto que ilustra la extracción de resinas naturales de los árboles de los bosques de *Pinus spp.*, en el área del Parque Nacional Nevado de Toluca.



Foto 2.3 Una vista de la perturbación antrópica ocasionada por la tala de árboles en el bosque de *Pinus hartwegii* (a los 3,800 msnm), en la Cuenca Alta del Río Temascaltepec, en la porción correspondiente al Parque Nacional.



Foto 2.4 Un ejemplo de las características comunes de la combinación del uso agrícola pecuario y forestal del suelo en el área en estudio, en este caso se trata de la localidad de San Andrés de los Gama (a los 2,200 msnm) al este de la localidad de Temascaltepec. Relativamente cerca de la salida de la cuenca.



Tales efectos van desde la extracción continua de resinas naturales de los árboles de los bosques de *Pinus*, lo cual reduce sustancialmente en los árboles afectados, las posibilidades de defensa ante las plagas de hongos e insectos, debido al aumento de su fragilidad (Foto 2.2), hasta las tallas clandestinas en los bosques de *Pinus hartwegii* (Foto 2.3), o bien al cambio de uso del suelo en amplias áreas de bosque convertidos a sitios con inducción de pastos (Foto 2.4).

En la Foto 2.4 se presenta un ejemplo que ilustra las características comunes de la combinación del uso agrícola y forestal del suelo en el área en estudio. Se trata del poblado de San Andrés de los Gama (a los 2,200 msnm) al este de la ciudad de Temascaltepec, relativamente cerca de la salida de la cuenca.

Los habitantes de la cuenca que hacen uso forestal, agrícola y pecuario del suelo (15 comunidades rurales, ver su distribución por uso agrícola en la Figura 2.3), tienen sus antecedentes culturales principalmente en los grupos indígenas mazahua, náhuatl y otomí. El número de habitantes pertenecientes al municipio de Temascaltepec es de 35,502 (SG-GEM, 1988). El mayor número de localidades de la cuenca pertenecen al municipio mencionado aún cuando un porcentaje mínimo del área de la cuenca está en el municipio de Zinacantepec.

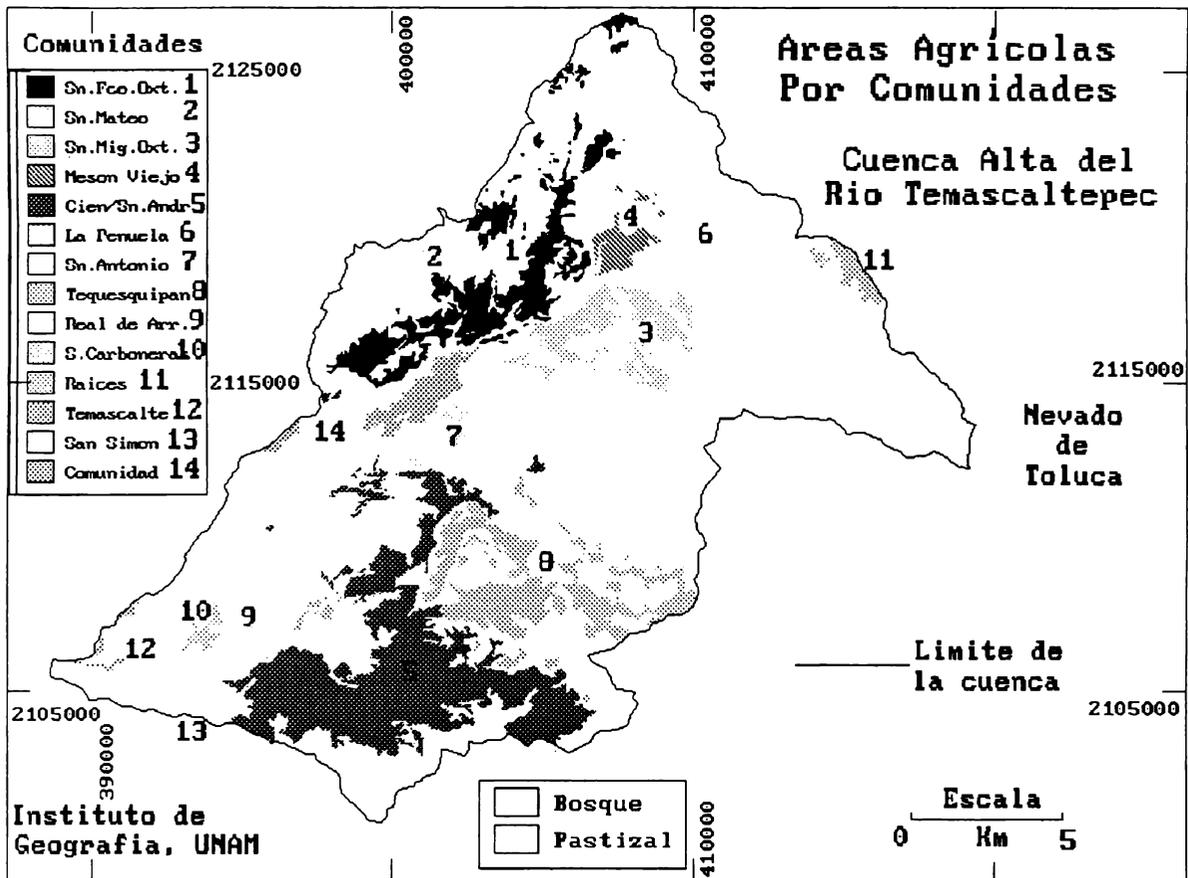
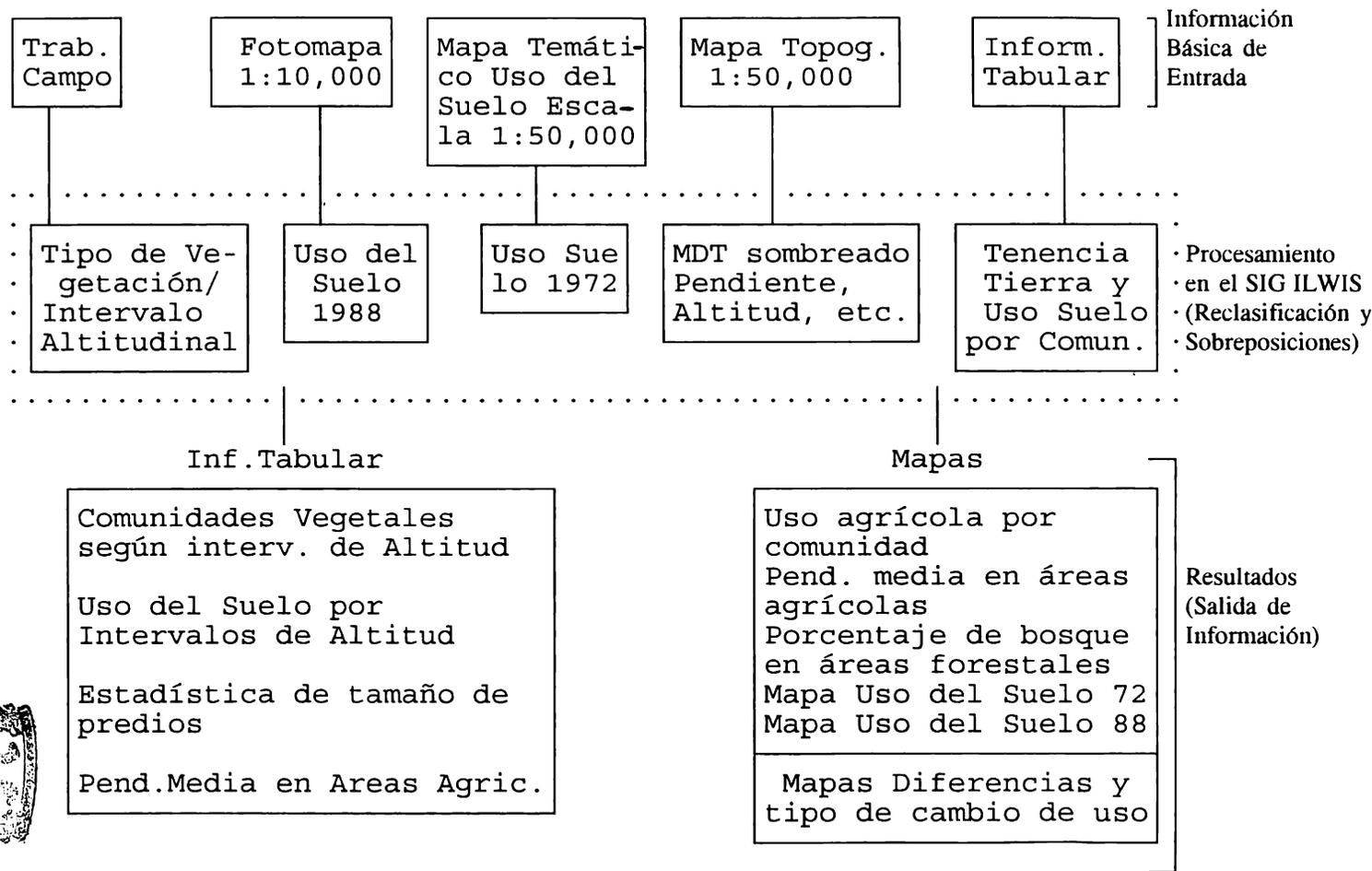


Figura 2.3 Áreas agrícolas agrupadas por comunidad establecida en la cuenca. Las comunidades de Cieneguillas y San Andrés de los Gama pertenecen al área con la clave 5. Se encuentran unidas ya que a la escala de la información original forman un sólo polígono.

2.3 METODOLOGIA

El enfoque metodológico empleado en este trabajo se representa de manera esquemática en la Figura 2.4. En ella se pueden observar las fases principales, los elementos empleados y las relaciones y procesos aplicados con tales elementos, dentro del contexto de manejo y análisis de la información en un SIG.



RIBRITOTCA
 DR. JORGE A. VIVO

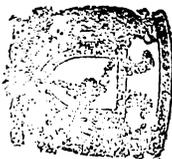


Figura 2.4 Esquema de la metodología empleada para la caracterización física de las áreas agrícolas y forestales y para la evaluación de cambios en el uso del suelo en la Cuenca Alta del Río Temascaltepec, Nevado de Toluca.

En una fase inicial de este trabajo, la correspondiente a la caracterización general de la vegetación, se aplicó parcialmente una variante de la metodología propuesta por la escuela fitosociológica de Zürich-Montpellier, la cual ya ha sido aplicada en Latinoamérica para fines de evaluación de la vegetación en zonas tropicales montañosas (Van der Hammen, 1983). En México se han realizado diversos estudios, en los cuales se ha aplicado el enfoque mencionado. Particularmente para la porción más alta del Nevado de Toluca, entre los 4,000 y 4,500 msnm, está el trabajo de González-Trápaga (1986:22), el cual se enfoca a las especies del páramo de altura.

La aplicación de esta metodología se desarrolló originalmente para efectos de estudios de vegetación a detalle. En este trabajo solamente se ha aplicado de manera marginal y sólo con fines de realizar una caracterización, de manera general y por intervalos de altitudes, en relación al tipo de vegetación dominante. En este trabajo se plantearon inicialmente una serie de actividades que servirían como objetivos específicos de trabajo diferentes a los mencionados antes, estos son:

1. Determinar de manera general los límites altitudinales de cada una de las comunidades vegetales del área a partir de los resultados preliminares de los perfiles de vegetación y muestras botánicas, obtenidos a partir del trabajo de campo.

2. Establecer las condiciones actuales de los predios considerados oficialmente como "*forestales*" por la SARH, en función del porcentaje de cobertura real de bosque en la actualidad, a partir de la digitización de los límites de esos predios forestales, sobre fotomapas a escala 1:20,000 (y su base de datos asociada), sobreponiéndolo con el mapa de uso del suelo de 1988.

3. Determinar la superficie ocupada (y el porcentaje con respecto al área total de la cuenca) de los usos del suelo y tipos de vegetación generalizados (bosque, agricultura, pastizal, etc.), según intervalos altitudinales.

4. Determinar los principales parámetros estadísticos descriptivos de los valores de pendiente media, en áreas agrícolas.

5. Determinar los parámetros estadísticos principales, de los valores de superficie, de las áreas agrícolas pertenecientes a cada una de las comunidades indígenas que las utiliza.

6. Delimitar los cambios de uso del suelo y vegetación en el lapso de 1972 a 1988, a partir del *cruzamiento* en el SIG de los mapas digitizados, con datos de 1972 de uso del suelo y vegetación a escala 1:50,000 de INEGI y fotomapas a escala 1:10,000 con una base de datos tabular anexa, para el ciclo agrícola 1988-1989, generada por el Gobierno del Estado de México.

7. Establecer un mapa de diferencias en porcentaje, entre el uso del suelo de 1972 con respecto al de 1988. Además caracterizar y analizar cuáles fueron los tipos de cambios y sus porcentajes, es decir, establecer los porcentajes de cambio por ejemplo entre cobertura de bosque a aprovechamiento agrícola, entre bosque y pastizal, entre pastizal y agricultura, etc.

La parte principal de la metodología empleada corresponde al uso de la tecnología de los sistemas de información geográfica (SIG). Estos han sido definidos de diversas maneras (ver Maguire *et.al.*, 1991 Vol.1), pero su característica principal es que permiten el manejo de una base de datos de objetos o entidades, en donde la localización y las relaciones espaciales de ellos juegan un papel primordial en el análisis.

De acuerdo a lo anterior y considerando los resultados que se han tenido con el uso de esta tecnología en la evaluación, conservación y manejo de los recursos naturales (Burrough, 1989; Albert, 1988 y Aronof, 1989) parece apropiada su aplicación para los objetivos de este trabajo. Se utilizó un SIG para la captura, el almacenamiento y análisis de la información. Esto se hizo en

ILWIS (Integrated Land and Water Information System) un SIG instalable en computadora personal del tipo AT (Valenzuela, 1988; ILWIS, 1993).

2.3.1. Entrada de la información básica y procesamiento preliminar.

El procedimiento seguido dentro del ambiente SIG, para el manejo de la información se puede resumir de la siguiente manera:

Se digitizó la información topográfica altitudinal de curvas de nivel, con equidistancia vertical a cada 20 m, tomándola como base a partir de las cartografía correspondiente a escala 1:50,000 (INEGI, 1986, ver Figura B.1 del Apéndice B). Además se digitizaron los límites de algunas localidades, cauces principales, límite de la cuenca, carreteras principales, etc.

Se digitizaron los límites de tipos de uso del suelo y vegetación de la cartografía correspondiente, producida por el INEGI (1976) a escala 1:50,000, generada por esta institución a partir de fointerpretación de fotografías aéreas a escala 1:25,000, tomadas en octubre de 1972.

Se digitizaron los límites de los diversos tipos de uso del suelo y vegetación, áreas erosionadas y áreas desprovistas de vegetación, a partir de los fotomapas a escala 1:10,000, para el período agrícola 1988-89 y su base tabular de datos correspondiente, generada por el Gobierno del estado de México (DSEI, 1990a y 1990b).

Se digitizaron los límites de los predios considerados oficialmente como forestales en explotación, según SARH, a partir de fotomapas a escala 1:20,000, para 1989 (DSEI, 1990a y 1990b).

2.3.2. Reclasificación y sobreposiciones para la obtención de los mapas finales.

La siguiente fase fue la reclasificación de información y la aplicación de funciones propias de un SIG, para la creación de los mapas finales en el establecimiento de los cambios de uso del suelo, y la caracterización dimensional y geométrica de las unidades de mapeo, dentro de la cuenca de estudio, este proceso se resume de la siguiente manera:

Transformación del mapa de curvas de nivel desde un formato "*vectorial*" a "*celdas*" o "*raster*" y una aplicación posterior de un modelo lineal de interpolación, para la generación del modelo digital del terreno (MDT) o matriz de datos altitudinales.

Transformación de los segmentos digitizados de uso del suelo y vegetación, para las dos fechas mencionadas, a formato de *celdas*, así como el de los predios "*forestales*". Esto se hizo a partir de la "*creación*" y agrupamiento de los polígonos que representan límites de área de uso-tipo de vegetación en *unidades de mapeo*. Esto es, todas las entidades geográficas o polígonos cuya cobertura pertenece a una misma clase de información, adquirieron el mismo atributo (valor de *celda*), el cual permitió la identificación e integración en una misma unidad de análisis cartográfico, de todos los polígonos individuales originales.

Aplicación de *filtros de convolución lineal* al MDT, para la obtención de los mapas de valores de pendiente y orientación de laderas por celda, así como el mapa de relieve sombreado (ver Figuras B.2 a B.4 del Apéndice B).

Aplicación de tablas de clasificación para la obtención de mapas finales por intervalos de valores.

Aplicación de tablas de *reclasificación* para agrupar, por ejemplo todas las unidades cartográficas

que ya habían sido clasificadas previamente por tener la misma clase (uso agrícola del suelo), estas fueron reclasificadas de acuerdo a la comunidad correspondiente que hace uso de cada una de ellas.

Aplicación de *funciones del calculador con mapas* a partir de diversos operadores, aritméticos, trigonométricos, de comparación, hasta la aplicación de *operadores booleanos*. Por ejemplo al aplicar una división entre una constante, de todos los valores *celda* de la matriz altitudinal o *MDT*, para generar menores contrastes, en la salida en tonos de gris, del modelo de relieve sombreado. Este proceso sucede después de haber aplicado un filtro direccional, de fuente de iluminación con cierta orientación (Figura B.2 del Apéndice B), al generar los mapas finales de diferencias en el uso del suelo y de tipos de cambio.

Como se marca en el esquema metodológico, en la fase de procesamiento y análisis, se realizaron *sobreposiciones y cruzamientos* de los mapas de pendientes y altitudes con los de superficies agrícolas y forestales, de acuerdo a la información digitizada a partir de los fotomapas y cartas mencionados. Se aplicaron los valores de las columnas de la base de datos tabular para obtener una simplificación por intervalos de pendiente para las superficies agrícolas, e intervalos de porcentaje de cobertura *real* de bosque para las forestales.

Se hizo una agrupación por clases, de la base de datos original de pendientes y altitudes (resultado de los *cruzamientos* mencionados), para así obtener una simplificación por intervalos de valores que fuesen adecuados para la representación cartográfica de los mapas finales, por ejemplo, en los intervalos de pendiente media en grados, para las superficies agrícolas así como de porcentaje de cobertura *real* de bosque, para los predios *forestales*.

El procedimiento seguido para la obtención de los mapas resultantes presentados en este trabajo, se resume en los siguientes puntos:

1. El mapa de intervalos altitudinales (Figura 2.2), resultó de la aplicación de una tabla de clasificación al MDT. Dicha tabla permitió agrupar cada una de las *celdas* dentro de su intervalo altitudinal correspondiente (7 clases en este caso).
2. El mapa de áreas agrícolas por comunidad se generó en base a la selección de las áreas agrícolas, del mapa de uso del suelo de 1988 (Figura 2.3), a las cuales se les aplicó una función de adecuación de la base de datos tabular, para señalar a cuál de las quince comunidades existentes en la cuenca, pertenece cada uno de los polígonos del uso mencionado, es decir se aplicó la columna *comunidad* de una tabla asociada de manera *relacional* a las unidades cartográficas del mapa de uso del suelo para 1988.
3. El mapa de pendiente media en áreas agrícolas, resultó del *cruzamiento* del mapa de valores de pendiente por *celda* (sin estar agrupadas en intervalos), con respecto a la clase *Agricultura* del mapa de uso del suelo para 1988 (ver Figura 2.5 en la sección 2.4.3). La base de datos resultante del *cruzamiento* se generalizó mediante las funciones de estadística descriptiva dentro del SIG y posteriormente se agruparon los polígonos de las áreas agrícolas, dentro de los intervalos de pendiente que se muestran en la Figura 2.5.
4. El mapa de porcentaje *real* de bosque para cada predio forestal, se obtuvo del *cruzamiento* del mapa de uso del suelo de 1988 (clase *Bosque*), con el mapa de predios forestales y su respectiva base de datos (Figura 2.6 en la sección 2.4.4). De esto resultó una base de datos que indicaba el porcentaje de *celdas* de clase *Bosque*, que corresponde a cada uno de los predios *forestales*. Después de ser asignados los porcentajes totales por predio forestal, cada uno de estos fue agrupado dentro de los cuatro intervalos que se han simbolizado en la figura mencionada.

5. Los mapas de uso del suelo para 1972 y 1988 (Figuras 2.7 y 2.8 en la sección 2.4.5), se obtuvieron a partir del agrupamiento por unidades de mapeo, de los polígonos generados a partir de la digitización de sus límites tomados de la base cartográfica mencionada (INEGI y Gob.del Edo.de Méx.).

6. El mapa de porcentaje de diferencias y similitudes por uso del suelo, para el período 1972-88, se obtuvo de la aplicación del operador booleano de comparación entre dos mapas, en este caso se aplicó el procedimiento de búsqueda de *diferencias entre dos mapas*. Con la utilización de un operador de condición y de uno de comparación, se obtuvo como resultado un mapa que contiene los *pixeles* o *celdas* cuyos valores son diferentes para las dos fechas (Figura 2.9 en la sección 2.4.5). Este proceso se realizó en dos pasos, el primero define con el atributo uno (1) de celda todos los sitios que no presentaron cambio en los dos mapas de comparación (Uso 1972 y Uso 1988). La sintaxis empleada fue la siguiente:

$$\text{Igual:} = \text{if}((\text{Area}=1)\text{and}(1972=1988), 1, 0)$$

Esto significa que el nuevo mapa que va a ser llamado *Igual* va a contener, con valor de celda 1, todos los pixeles que tanto en el mapa 1972 tengan el mismo valor, como para el mapa 1988. El mapa resultante *Igual* (el cual está en formato *byte*, valores entre 0 a 255) va a tener solamente dos valores posibles, cero o uno. La condición de que en el mapa *Area* el valor tiene que ser igual a uno, es para seleccionar y comparar solamente el área correspondiente a la cuenca en estudio. Es decir, los valores de atributo uno, en el mapa *Area*, son los correspondientes a las *celdas* que están dentro de la cuenca, y por lo tanto son los únicos que van a ser comparados.

De manera similar a la anterior, el segundo paso permitió generar un mapa llamado *Dife* mediante la sintaxis:

$$\text{Dife:} = \text{if}((\text{Area}=1)\text{and}(1972 <> 1988), 2, 0)$$

Este mapa, que también está en formato *byte*, resulta de comparar solamente dentro del área de la cuenca (esto es, que *Area* se igual a uno), los sitios o *celdas* donde se tienen valores diferentes, tanto para el mapa 1972 como para el 1988. Los sitios que cumplen esta condición se le llama dos en el nuevo mapa (*Dife*).

Estos dos mapas nuevos (*Igual* y *Dife*) se integraron en uno solo, también mediante el uso de operadores booleanos, y Después fue calculado su histograma. Con esta función se determinaron los porcentajes de cobertura (cantidad de *celdas*), que tiene cada clase de información (valor uno de *pixel* para igual uso y dos para diferente, ver Figura 2.9).

El mapa de tipos de cambio de uso del suelo para el período 1972-88 (Figura 2.10 en la sección 2.4.5) se obtuvo de la aplicación sucesiva de operadores booleanos de condición (*if, then*) y de comparación (=, >, <, <>, etc.) al hacer la consideración de tres mapas a la vez. Un ejemplo de aplicación de tales operadores fue el empleado para definir aquellas áreas, que además de tener diferencias en uso del suelo entre 1972 y 1988 (mapa de diferencias *dife*) también tendría que haber cambiado, de cobertura de bosque en 1972 a áreas de aprovechamiento agrícola en 1988 (*BosqAgri* del mapa de la Figura 2.9). La secuencia en sintaxis del SIG para la aplicación mencionada, se presenta en el siguiente enunciado:

$$\text{TipCamb:} = \text{if}((\text{Dif}=1)\text{and}(1972=\text{Bosq})\text{and}(1988=\text{Agri}), 1, 0)$$

Esto es, el mapa nuevo *TipCamb* resultará de cumplir la condición de que el mapa de diferencias *Dif* sea igual a 1 (uno), es decir que si haya diferencia entre 1972 y 1988, además que en el mapa 1972 sea igual a Bosque (*Bosq*) y además que en el mapa 1988 sea igual a Agricultura (*Agri*), si todo esto se cumple el mapa resultante *TipCamb* tendrá pixeles con atributo uno (1), en caso contrario tendrá cero (0).

Este procedimiento, a partir de la aplicación de enunciados semejantes al mostrado, se realizó para cada uno de los tipos de cambio posibles, en cualquier sentido (ver explicación en la sección 2.4.5 y leyenda de la Figura 2.10), de tal manera que al final de esta fase se habían generado un conjunto de ocho mapas, los cuales fueron integrados en uno solo, mediante funciones comparativas y de asignación de nuevos valores a las *celdas* que cumplieren una condición establecida.

2.4 RESULTADOS POR TEMAS

Se presentan resultados numéricos y cartográficos de la evaluación, tanto por niveles altitudinales, intervalos de pendiente, tamaños de las superficies de uso, como en relación a otros aspectos.

2.4.1. Intervalos altitudinales y uso del suelo.

Los resultados muestran que los intervalos altitudinales que cubren el mayor porcentaje de extensión de la cuenca son: con un 40% el de 2,500 a 3,000, de 2,000 a 2,500 con un 25% y de 3,000 a 3,500 con un 23%. Los resultados generales en relación al uso del suelo muestran que, para la superficie total de la cuenca en 1972, había un 72.7% de bosque, agricultura con 20.4% y 4.9% de pastizal. Para 1988 hubo un 69.3% de bosque, agricultura con 25.1% y 4.1% de pastizal.

Para la misma fecha (1988), en el intervalo de menos de 2,000 msnm se presentan casi el total de las áreas erosionadas de toda la cuenca (ver Tabla 2.2). Un 9% de este intervalo altitudinal (7% de la cuenca) corresponde a ese rubro.

Tabla 2.2 Porcentaje de uso del suelo con respecto a intervalos altitudinales para 1988*

Intervalo msnm	Agri	Bosq	Eros	Past	PaAlp	SinVeg	Total
<2000	13.8	76.4	8.6	1.1	0.0	0.0	100
2000-2500	41.1	58.2	0.7	0.0	0.0	0.0	100
2500-3000	32.1	64.7	0.0	3.2	0.0	0.0	100
3000-3500	5.0	84.6	0.0	10.4	0.0	0.0	100
3500-4000	3.5	89.7	0.0	6.2	0.3	0.3	100
4000-4500	0.0	8.7	0.0	0.0	39.9	51.4	100
>4500	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	100

* LOS DATOS CORRESPONDEN A LA INFORMACION OBTENIDA DE LOS FOTOMAPAS A ESCALA 1:10,000 PARA EL CICLO AGRICOLA 1988-1989. FUENTE: DSEI (1990a). CLAVE: AGRI=AGRICULTURA, BOSQ=BOSQUE, EROS=AREAS EROSIONADAS, PAST=PASTIZALES NATURALES E INDUCIDOS, PAALP=PASTIZAL ALPINO, SINVEG=SIN VEGETACION, TOTAL=PORCENTAJE TOTAL POR INTERVALO. LOS PORCENTAJES DE CADA INTERVALO CON RESPECTO AL TOTAL DE LA CUENCA SON: <2000= 7%, 2000-2500= 25%, 2500-3000= 40%, 3000-3500=23%, 3500-4000=5%, 4000-4500=1%, >4500= 0%.

A pesar de que los intervalos entre 3,000-3,500 y 3,500-4,000 poseen en su interior más del 80% de cobertura de bosque, no se puede decir que ellos sean los que poseen mayor valor absoluto de esa cobertura en toda la cuenca, ya que los intervalos que poseen mayor superficie son los de 2,500-3,000 (40% de la cuenca y con 65% de bosque) y 2,000-2,500 (25% de la cuenca y 58% de bosque, ver Tabla 2.2). En estos dos últimos intervalos también se encuentra la mayor cantidad de superficie, en valor absoluto, con respecto al uso agrícola del suelo (32% de áreas agrícolas del 40% de la totalidad de la cuenca y 41% del 25% correspondiente).

Conforme las altitudes de los intervalos se hacen mayores, los valores de superficies de áreas agrícolas son menores, tanto en porcentaje al interior de los intervalos como con respecto al total de la superficie de la cuenca. El porcentaje de cobertura de pastizal alpino es mínimo en la cuenca, sólo se localiza en el intervalo de los 4,000 a 4,500 msnm, además y en muy pequeña proporción en el intervalo que lo antecede (Tabla 2.2). Con respecto a las áreas con pastizales inducidos y naturales, se localizan en varios intervalos desde menos de 2,000 msnm hasta los 4,000. Sin embargo, los dos intervalos altitudinales en donde hay mayor frecuencia de ese uso, está entre los 2,500 y 3,500 msnm.

2.4.2. Características de las áreas agrícolas en relación a las comunidades.

El número de polígonos agrícolas por comunidad, así como su superficie, se señalan en la Tabla 2.3. Las comunidades que presentan mayor número de áreas agrícolas son: San Francisco Oxtotilpan con 35, correspondiendo a un 16% de la superficie agrícola total de la cuenca y Tequesquipan con 28 (16% del área agrícola).

Tabla 2.3 Valores de superficie media del conjunto de áreas agrícolas que pertenecen a cada comunidad.

Comunidad	No.de Poligs	%Sup*	Media	DesvEst	Median	Domin
Sn.Fco.Oxtotilpan	35	16.2	0.43	1.88	0.04	0.01
Sn.Mateo	6	2.8	0.44	0.70	0.14	----
Sn.Miguel Oxtotilp	26	10.0	0.36	0.73	0.03	0.01
Mesón Viejo	9	2.3	0.24	0.61	0.01	0.01
Cieneguilla/Sn.And	10	37.6	3.50	10.07	0.09	0.04
La Peñuela	9	1.8	0.18	0.48	0.01	0.01
Sn.Antonio	5	4.2	0.79	1.43	0.07	----
Tequesquipan	28	15.8	0.52	1.24	0.08	0.01
Real de Arriba	5	1.2	0.23	0.35	0.02	----
S.Carboneras	6	1.0	0.15	0.32	0.01	0.00
Raíces	3	1.6	0.49	0.57	0.16	----
Temascaltepec	5	1.2	0.24	0.24	0.15	0.01
Sn.Simón	1	0.2	0.18	----	----	----
La Comunidad	2	4.0	1.85	1.47	1.85	----
Total y promedios	193	100.0	0.69	1.43	0.19	0.01

%SUP* EL VALOR DEL PORCENTAJE ES CON RESPECTO AL AREA AGRICOLA TOTAL DE LA CUENCA. LOS VALORES DE SUPERFICIE DE POLIGONOS ESTAN EN km2. NO.DE PRED. = NUMERO DE AREAS AGRICOLAS (POLIGONOS EN EL SIG), MEDIA= SUPERFICIE MEDIA DE LOS VALORES MEDIOS DE CADA UNIDAD DE PRODUCCION AGRICOLA PARA LA COMUNIDAD CORRESPONDIENTE, DESVEST= DESVIACION ESTANDAR, MEDIANA= VALOR DE LA MEDIANA DE LAS SUPERFICIES CONSIDERADAS, DOMIN= VALOR MAS FRECUENTE.

Sin embargo para las comunidades Cieneguilla y San Andrés que tienen solamente diez polígonos les corresponde el 38% de la superficie agrícola (área mostrada en la Foto 2.4, ver las coberturas marcadas con las claves 1, 8 y 5 respectivamente de la Figura 2.3).

A partir de los parámetros estadísticos básicos marcados en la Tabla 2.3, se puede observar que las comunidades de Cieneguilla y San Andrés, presentan una superficie media por polígono agrícola de 3.5 km², sin embargo este dato no es representativo ya que el valor de la desviación estándar es muy alto (10 km²), lo cual indica la alta dimensión de la dispersión entre valores de superficie grandes y pequeños (mediana de 0.09 km²).

En general los valores de desviación estándar para todas las comunidades son muy altos, esto se explica por dos razones: por un lado la cantidad de predios (polígonos) por comunidad es muy variable, por ejemplo, a San Simón le corresponde solamente un predio (dentro de los límites de la cuenca) en cambio, San Francisco, Oxtotilpan y Tequesquipan tienen 35 y 28 respectivamente.

Por otro lado se han agrupado aquí diferentes tipos de tenencia de la tierra, las superficies más extensas corresponden en su mayoría a terrenos ejidales y comunales (tipos de propiedad colectiva, ver Esteva 1980:142-162) en cambio los predios de menor superficie corresponden al régimen de propiedad privada.

Es importante decir, que los valores de superficie que se están considerando aquí, no corresponden en muchos de los casos a unidades de producción agrícola, cuya posesión está dada por un sólo propietario. Específicamente se trata de áreas cuyo uso del suelo, a la escala del análisis, se puede considerar como homogéneo a su interior, por lo tanto es seguro que esos *polígonos-predios* los cuales tienen dimensiones del orden de km², están conformados por múltiples parcelas de dimensiones pequeñas y con diversos propietarios, en el caso de ser áreas ejidales y por comunidades indígenas completas en las áreas que se encuentran en este régimen de propiedad.

2.4.3. Características de la pendiente media de las áreas agrícolas, en relación a las comunidades.

De los resultados obtenidos con respecto al análisis de las condiciones de inclinación de los terrenos agrícolas, se puede concluir lo siguiente: al 54% de la superficie agrícola le corresponde un valor de pendiente media de 11° (tres comunidades). El siguiente valor de pendiente media que cubre un 19% de la cuenca es el de los 9°, estas superficies corresponden a tres comunidades, principalmente a Tequesquipan con un 16%. El 46% restante presenta un intervalo de pendiente media que va de los 5° a los 9°. Las áreas de explotación agrícola que presentan los valores de pendiente máxima (por pixel) más alto, se localizan en las comunidades de San Francisco Oxtotilpan en el norte y Tequesquipan en el centro este de la cuenca (Tabla 2.4).

Para fines de presentación cartográfica, en la Figura 2.5 se muestra, con diferentes tonalidades, los intervalos de pendiente media en áreas agrícolas. En este caso se han jerarquizado cada una de las áreas agrícolas, independientemente de la comunidad a la cual corresponde. La mayoría de las áreas con ese uso del suelo se agrupa en el intervalo de 4° a 12°. Las áreas que se han agrupado en el intervalo que corresponde a los valores más altos de pendiente media (20° a 35°), se localizan en la porción norte de la cuenca.

2.4.4. Características dimensionales de los predios considerados oficialmente como potencialmente forestales.

La mayoría de los predios forestales que se encuentran en el intervalo altitudinal de los 2,000 a los 3,000 msnm, presentan menos del 60% de cobertura actual de bosque (Figura 2.6), en el 40% restante de la superficie de estos predios se presenta un uso agrícola del suelo. Esto se corrobora al observar en la Figura 2.3 la extensión de áreas agrícolas para dicho intervalo.

Tabla 2.4 Valores de pendiente media al interior de las áreas agrícolas del conjunto que pertenece a cada comunidad.

Comunidad	%Sup*	Media	Máx	Mínim	Domin	Mediana
Sn.Fco.Oxtotilpan	16.2	11	72	0	6	0
Sn.Mateo	2.8	6	33	0	3	0
Sn.Miguel Oxtotilpan	10.0	7	39	0	5	0
Mesón Viejo	2.3	9	52	0	3	0
Cieneguilla/Sn.Andrés	37.6	11	50	0	3	0
La Peñuela	1.8	8	49	0	6	2
Sn.Antonio	4.2	6	32	0	3	0
Tequesquipan	15.8	9	62	0	3	0
Real de Arriba	1.2	8	30	0	1	1
S.Carboneras	1.0	5	32	0	2	0
Raíces	1.6	8	25	1	5	2
Temascaltepec	1.2	9	36	0	10	0
Sn.Simón	0.2	7	22	0	3	2
La Comunidad	4.0	7	37	0	3	0
Totales y promedios	100.0	7.9	40.8	0.1	4.0	0.5

%SUP* EL VALOR DEL PORCENTAJE ES CON RESPECTO AL AREA AGRICOLA TOTAL DE LA CUENCA. MEDIA= PENDIENTE MEDIA DE LOS VALORES MEDIOS DE CADA UNIDAD DE PRODUCCION AGRICOLA PERTENECIENTE A CADA COMUNIDAD (EN GRADOS), MAX= VALOR DE PENDIENTE MAXIMA REGISTRADA POR PIXEL, MINIM= VALOR DE PENDIENTE MINIMA REGISTRADA POR PIXEL, DOMIN= VALOR MAS FRECUENTE, MEDIANA= VALOR DE LA MEDIANA DE LAS PENDIENTES POR PIXEL CONSIDERADAS. EL VALOR PROMEDIO DE PENDIENTE MEDIA PARA TODA LA CUENCA (7.9) NO ES UN VALOR PONDERADO POR PORCENTAJE DE SUPERFICIE.

Tabla 2.5 Características dimensionales de los predios considerados oficialmente por la SARH como forestales en explotación*

Interv. de Sup (Km2)	No.de Predios	Media	DesvEst	Mediana	Dominante
0.01-<0.1	29	0.05	0.02	0.05	0.06
0.10-<0.2	29	0.15	0.03	0.15	0.15
0.20-<0.6	25	0.33	0.11	0.32	0.25
0.60-<1.0	16	0.73	0.10	0.73	0.60
1.00-<5.0	27	2.12	0.94	1.95	2.00
5.00-<10.0	13	7.25	1.34	6.98	7.00
10.0-<40.0	9	18.05	8.65	14.96	15.00
Total y/o Media	148	4.10	1.60	3.59	3.58

* LOS DATOS CORRESPONDEN A LA INFORMACION OBTENIDA DE LOS FOTOMAPAS A ESCALA 1:20,000 PARA 1989. FUENTE DE LOS FOTOMAPAS: DSEI (1990b).

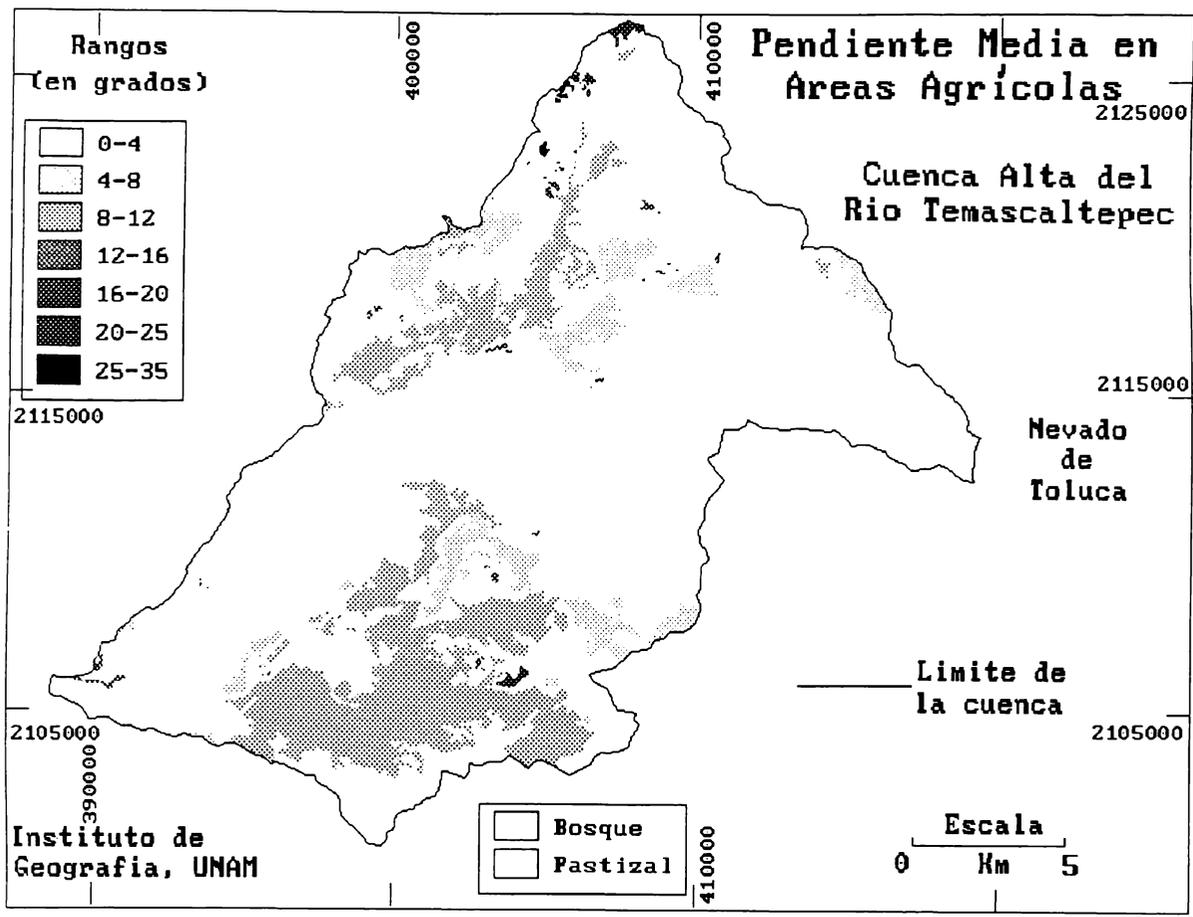


Figura 2.5 Mapa de intervalos de pendiente media para áreas con uso agrícola del suelo.

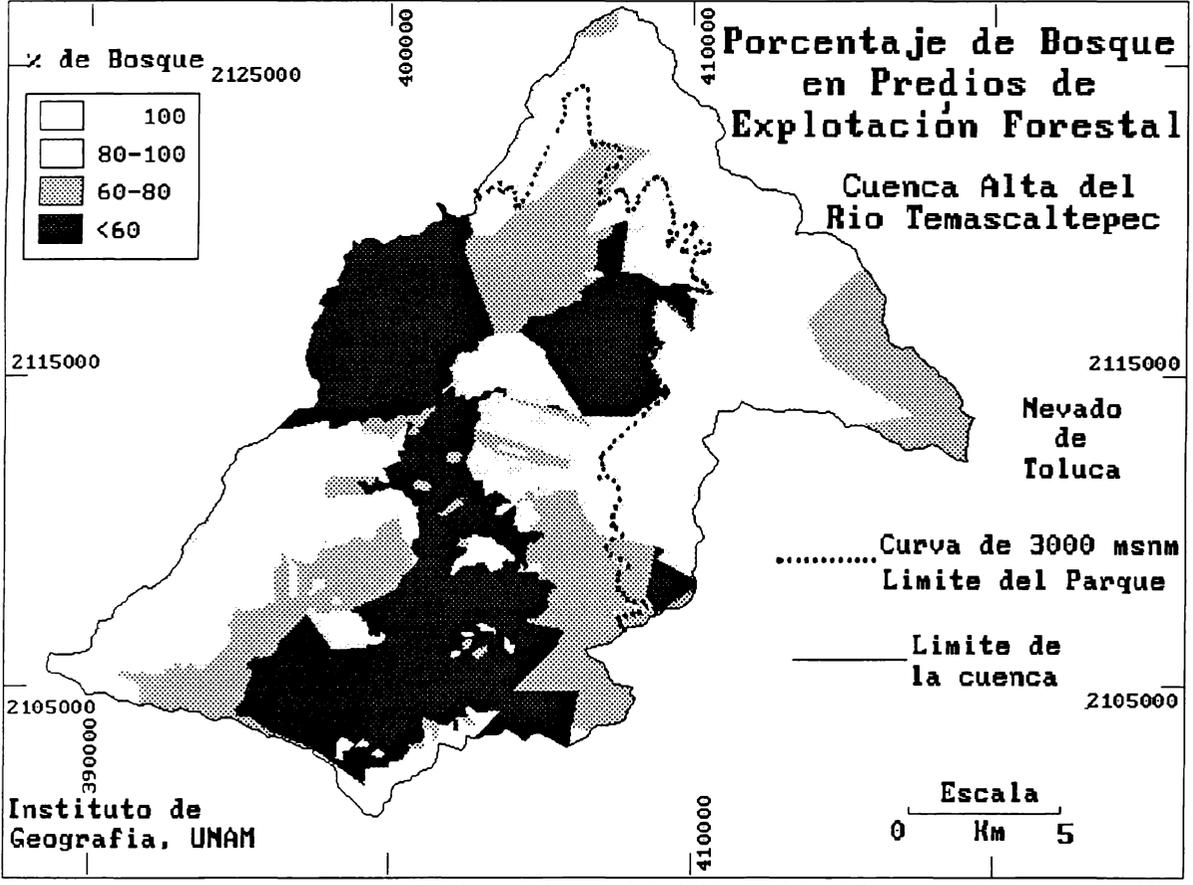


Figura 2.6 Mapa de porcentaje de bosque para los predios forestales. La curva de los 3000 msnm define el limite inferior del Parque Nacional Nevado de Toluca.

En la Tabla 2.5 se muestra el número de predios forestales por rangos de superficie en km², de los 148 predios totales, 83 (56%) presentan un rango de superficie de 0.01 a menos de 0.6 km², y solamente 9 predios (6%) se encuentran en el rango de 10 a 40 km². El valor medio de superficie para los 148 predios forestales es de 4.1 km² con un 39% de coeficiente de variación.

Este valor medio no es representativo estadísticamente debido a que se tienen muchos predios con valores bajos de superficie y pocos con valores altos. Por ejemplo para el primer intervalo se tiene una media de 0.05 km² con 29 predios (0.02 de desviación estándar) y para el último se tiene un valor medio de 18.1 km² con 9 predios (8.7 de desviación estándar).

La presencia de valores medios tan contrastantes se explica por la existencia de predios forestales explotados de manera colectiva (*ejidos y comunidades*) los cuales corresponden a explotaciones extensas y por otro lado predios forestales menos extensos los cuales son explotados por particulares.

Es importante hacer la aclaración en relación al predio forestal ubicado en la ladera oeste del Nevado de Toluca (porción noreste de la cuenca). A este predio le ha correspondido el intervalo de 60%-80% de cobertura de bosque, esto podría parecer extraño, ya que se encuentra en una área en la que se podría esperar tener una cobertura de bosque cercana al 100%. La explicación de esto es simple, ya que justamente este predio se encuentra en la transición entre el bosque de *Pinus* y las áreas de pastizal alpino o páramo de altura, o bien en algunas áreas desprovistas de vegetación, lo cual hace que evidentemente no se encuentre entre los predios de mayor cobertura de bosque.

2.4.5. Diferencias y tipos de cambio de uso del suelo 1972-1988.

Los resultados que se muestran en forma gráfica y numérica en las Figuras 2.7 y 2.8, sintetizan las coberturas de uso del suelo y vegetación para la extensión temporal mencionada (1972-1988). Si se observan alternativamente los dos mapas de uso del suelo, inmediatamente se detecta en cuáles sitios han existido cambios de uso en ese lapso. En general el comportamiento ha sido de ampliaciones de áreas de uso agrícola dentro de áreas boscosas. Esto se nota más fácilmente en la porción sur de la cuenca, en el área correspondiente a la comunidad de San Andrés de los Gama (Foto 2.4 y área marcada con clave 5 de la Figura 2.3).

Los resultados de la parte correspondiente a la evaluación de cambio de uso del suelo, muestran que en principio existe una diferencia de uso, de cualquier tipo, en un 16.5% del total del área de la cuenca (Figura 2.9). Esto es, el 84.5% del área permaneció con el mismo uso en el lapso mencionado. Dentro de los tipos de cambios de uso de suelo específicos se presentaron los siguientes (ver Figura 2.10):

De bosque a agricultura (*BosqAgri*) le corresponde un 37.4% el cual es mayor porcentaje dentro de las diferencias totales. Se localizan estos cambios principalmente en la porción sur de la cuenca, cercana a la localidad de San Andrés de los Gama, también existen algunas áreas en la parte centro-sur y noreste. Este tipo de cambio se explica debido sobre todo a la búsqueda de las comunidades para realizar aperturas o "*roturaciones*" de áreas boscosas para su utilización en cultivos y para la inducción de pastizales.

Cambios de bosques a pastizales, inducidos o naturales (*BosqPast*), con un 15.4% del total de los cambios detectados. En relación a esto, las áreas en donde se presenta este cambio de manera más clara es en las porciones este, norte y noreste de la cuenca, esta última porción se encuentra dentro de los límites del Parque Nacional Nevado de Toluca (ver también el mapa de diferencias de uso en la Figura 2.9).

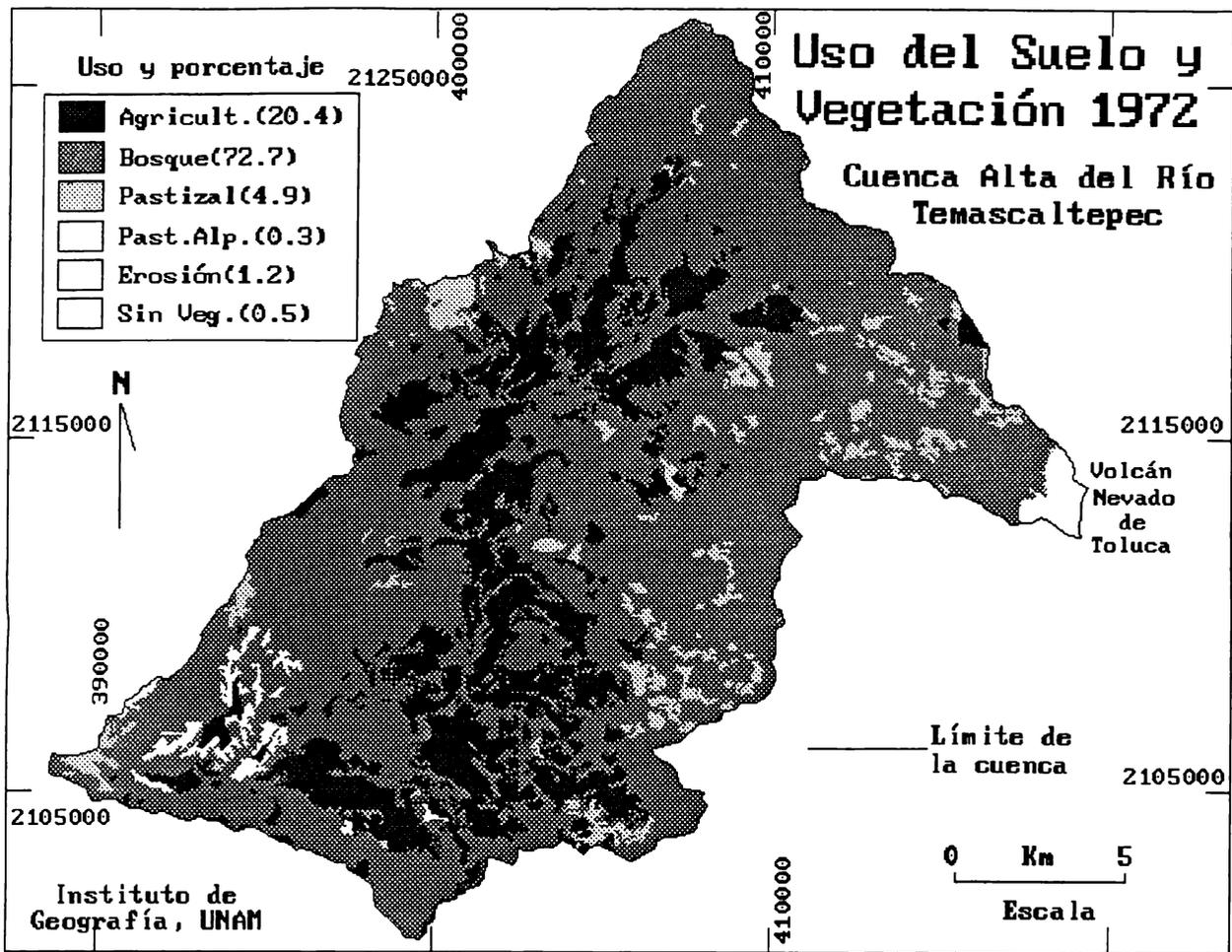


Figura 2.7 Mapa de uso del suelo y vegetación para 1972, Cuenca Alta del Río Temascaltepec, Nevado de Toluca.

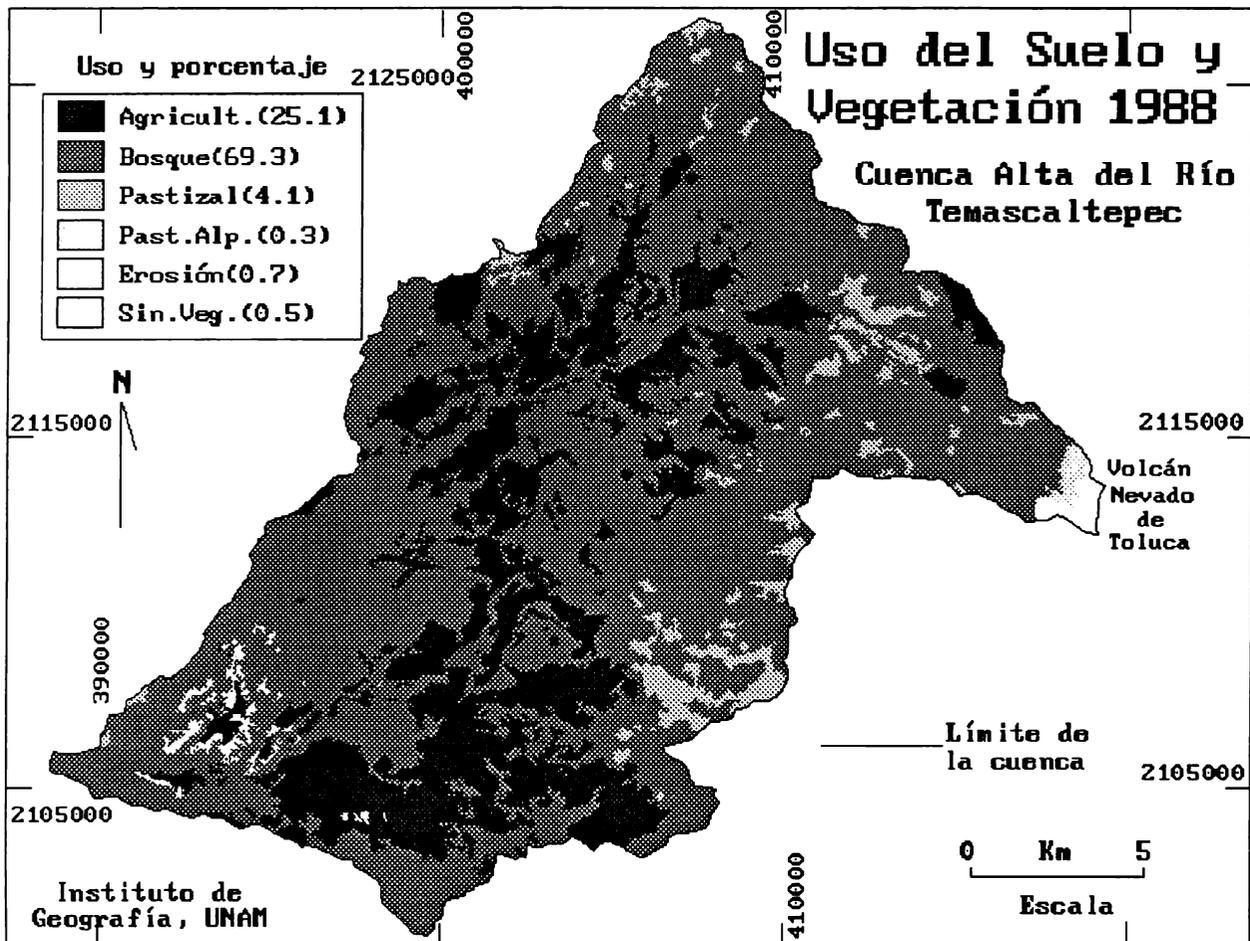


Figura 2.8 Mapa de uso del suelo y vegetación para 1988, Cuenca Alta del Río Temascaltepec, Nevado de Toluca.

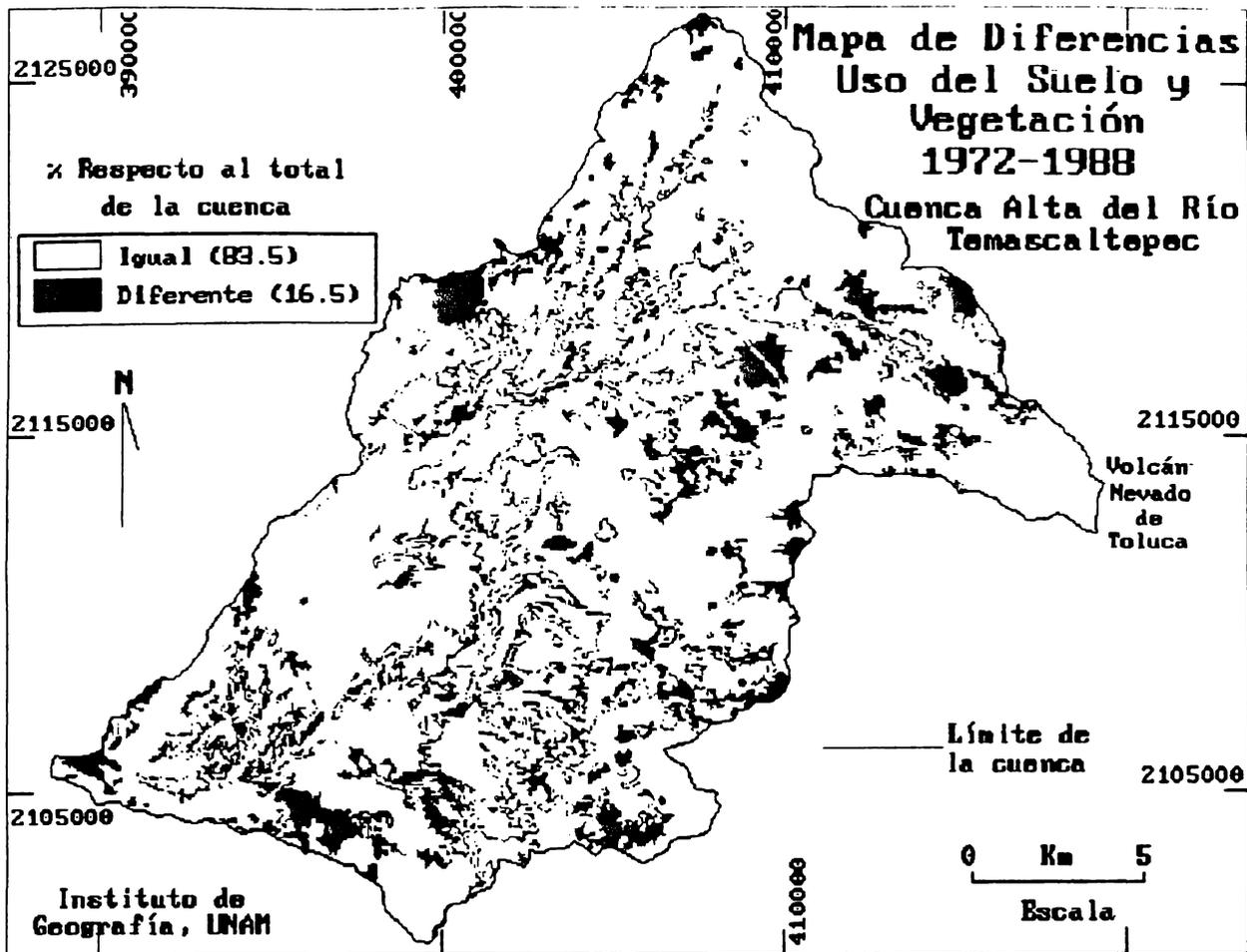


Figura 2.9 Mapa de porcentaje de diferencias y similitudes por uso del suelo para el período 1972-88.

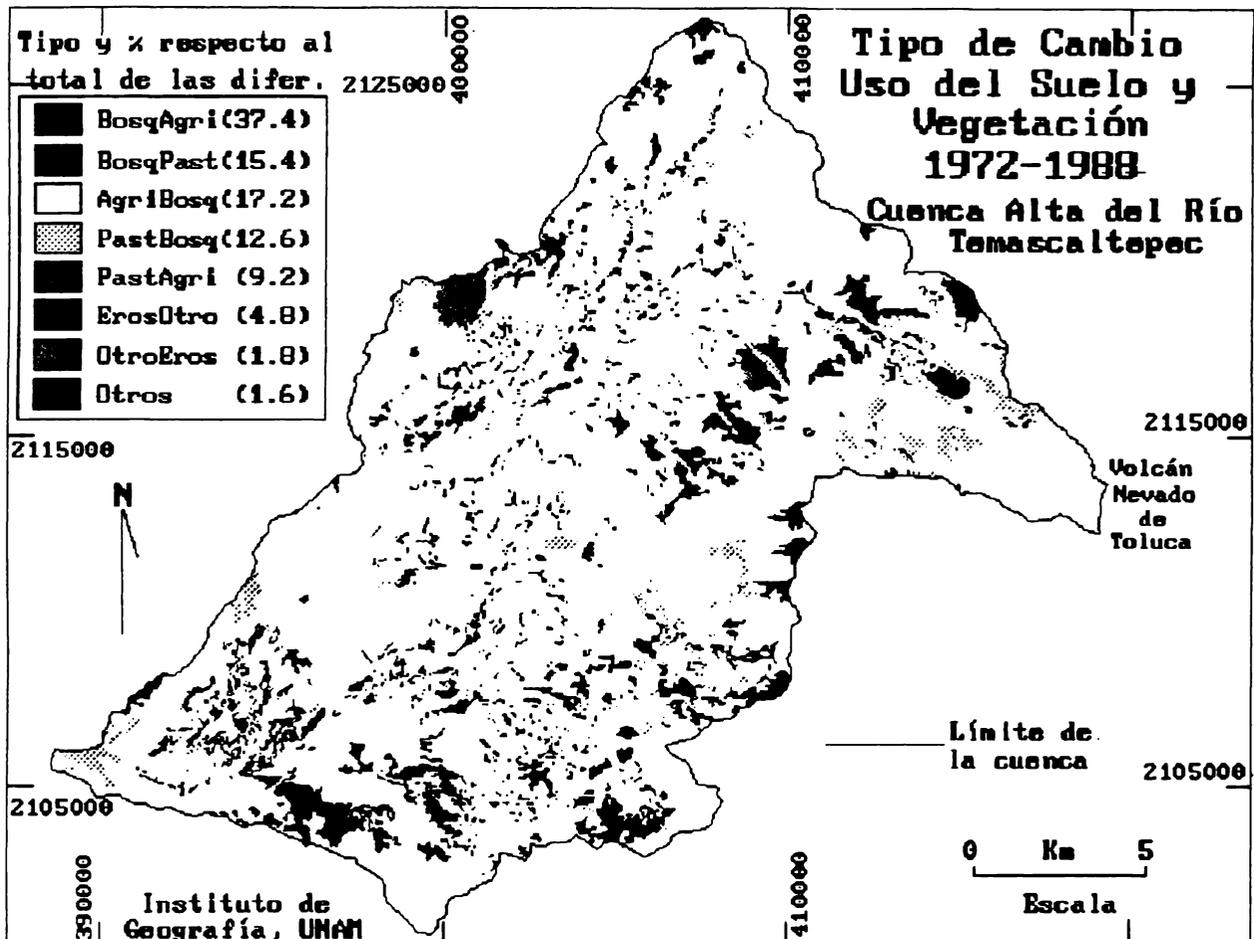


Figura 2.10 Mapa por tipo de cambio de uso del suelo para el período 1972-88 (ver significado de la leyenda en el texto).

Presencia de cambios de agricultura a bosque (*AgriBosq*) con un 17.2%. Se localizan en amplias áreas alargadas y *envolventes* en el centro de la cuenca. Este es un tipo de cambio que es poco probable que exista en la realidad, se presentó en este estudio debido probablemente, a causa de dos aspectos principales, primero, el criterio de generalización empleado al fotointerpretar en INEGI, durante el proceso para la realización de la cartografía de uso del suelo y vegetación, segundo, la menor resolución del detalle al dejar delimitadas las áreas de uso del suelo y vegetación en una cartografía escala 1:50,000 (ver siguientes párrafos). Una tercer razón para la presencia de estos cambios, es la posible equivocación en las asignación en los usos del suelo en la fase de fotointerpretación o en la de edición cartográfica.

Pastizal a Bosque (*PastBosq*) con un 12.6%. En este sentido, este cambio es también poco probable que suceda, se explica principalmente por los diferentes criterios que se pueden presentar (de acuerdo al fotointerprete), para delimitar coberturas de bosque y pastizales naturales e inducidos.

Hay que tener en cuenta que a causa de las perturbaciones detectadas en el área de estudio, existen muchos sitios en donde por un lado, se encuentran mezclados los dos usos mencionados, donde no hay una cobertura dominante de ninguno, en otros sitios hay áreas tan perturbadas en relación a cortes clandestinos de árboles que es fácilmente confundible con una mezcla de dichos usos.

2.5 RESULTADOS GENERALES Y DISCUSIÓN

Los intervalos altitudinales que poseen mayor superficie dentro de la cuenca son los de 2,500-3,000, con un 40% del total y el de de 2,000 a 2,500 el cual tiene el 25% del área de la cuenca en su interior. Los intervalos que poseen mayor superficie de cobertura de bosque son los de 2,500-3,000 con 65% y el de 2,000-2,500 con 25%, en pendientes que van de los 4° a 12°. En esos dos intervalos está incluida, en términos absolutos, la mayor cantidad de superficie de uso agrícola del suelo (32% y 41% respectivamente).

La mayoría de los predios forestales localizados en el intervalo altitudinal de los 2,500 a 3,000 msnm presentan menos del 60% de cobertura de bosque.

De la superficie total de la cuenca para 1972, el 73% era bosque el 20% fue agrícola y el 5% fue pastizal. En cambio para 1988 fue de 69% de bosque, 25% de agricultura y 4% de pastizal.

De la superficie total de la cuenca para 1988 se tiene que un 69.3% está cubierta de bosque, existen diferentes asociaciones que van desde el *Pinus hartwegii*, en las partes más altas, hasta asociaciones de *Quercus* con otras latifoliadas en las más bajas. Un 25.1% del suelo de la cuenca se usa para actividades agrícolas y un 4.1% se encuentra cubierta con pastizal natural e inducido.

Para la misma fecha (1988), en el intervalo de menos de 2,000 msnm se presentan casi el total de las áreas erosionadas de toda la cuenca. Un 9% de este intervalo altitudinal (7% de la cuenca) corresponde a ese rubro.

De las quince comunidades humanas que habitan en la cuenca, diez se encuentran en el intervalo de los 2,000 a 3,000 msnm el cual comprende el 65% del área de la cuenca.

Por arriba de los 3,000 msnm el suelo de la cuenca está siendo usado para el pastoreo, sobre comunidades de pastizal natural de *Agrostis* y *Calamagrostis*. Existen grandes áreas de inducción de pastizales, mediante "quemadas", en las porciones con cobertura de *Pinus hartwegii*, debido a la presencia de asentamientos humanos, como Raíces y La Peñuela, en el interior del Parque Nacional Nevado de Toluca.

El valor de pendiente media (11°) para las áreas agrícolas es relativamente alto. Los valores mayores de esta variable se localizan en la porción norte de la cuenca, aunque su cobertura no es amplia. El uso agrícola del suelo se da primordialmente en las unidades morfogenéticas de 1. Superficies cumbrales y escarpes de flujos lávicos basálticos del cuaternario y 2. Superficies cumbrales de flujos lávicos andesíticos y dacíticos del terciario, cubiertas de piroclastos del cuaternario.

El tamaño de las áreas agrícolas y forestales está relacionado con la tenencia de la tierra. Este hecho se observa claramente para el caso de los predios forestales, donde el 56% de ellos presenta los intervalos de superficie que no sobrepasan los 0.6 km^2 , éstos son explotados por propietarios particulares, y el 6% de tales predios, que corresponden al de valores más grandes de superficie (de 10 a 40 km^2) pertenecen a predios comunales.

El tamaño de los predios forestales se encuentra en relación con la tenencia de la tierra. La mayoría de los predios (56%) presentan una superficie menor de 0.6 Km^2 que corresponde a áreas de propiedad privada, una cantidad menor (6%) presenta valores entre 10 y 40 Km^2 , propiedad comunal. Las áreas desprovistas de vegetación se localizan particularmente en las porciones más altas del Nevado de Toluca, después de la cota de los 4,000 msnm.

Debido a las diferentes resoluciones espaciales de las escalas empleadas, se plantea normalmente la justificación de no incluir polígonos o bien algunos de los detalles de su configuración, los cuales a juicio del fotointerprete y del cartógrafo formador, no es factible que sean simbolizados en el mapa final editado. Esto se ha argumentado continuamente en base al concepto de unidad mínima cartografiada (UMC), es decir, el decidir no incluir polígonos de tamaño menor a la unidad mencionada, asumiendo que no se influye de manera importante en los resultados finales. Concluyendo, las dos dimensiones de UMC en las dos escalas consideradas (1:50,000 y 1:10,000) han propiciado aparentemente las diferencias marcadas entre tales detalles de información y por lo tanto los cambios no reales, de agricultura a bosque, en el uso del suelo de la cuenca.

En la Figura 2.9 hay un hecho notable (particularmente en las áreas centro y centro-norte de la cuenca), existen muchas áreas alargadas que semejan bordes de algo que estaba encerrado originalmente. Esto se explica como un resultado seguramente de las diferencias entre los límites definidos de áreas de uso del suelo a partir de dos criterios diferentes para su delimitación (INEGI, 1976 y DSEI, 1990a). Esto es, no hay una coincidencia perfecta en los límites de las áreas que, aún cuando son de la misma clase de uso del suelo, para las dos fechas, no corresponden espacialmente, por diversas razones, con los que se establecieron en las dos diferentes fuentes de información.

En la literatura sobre los SIG se hace alusión a la posibilidad de hacer un ajuste de bordes de unidades de mapeo, con el fin de que las áreas que sabemos que deben ser coincidentes en el espacio así lo sean, muchas veces y por diversas razones no se presentan condiciones de coincidencia total de límites. Esta función de análisis espacial para el ajuste de bordes, Aronoff (1989:201) la define dentro del tipo "*Conflation*" (en idioma inglés, un término equivalente en español sería "*Cooregistro*"). Esta función no se aplicó en la información procesada en este trabajo, debido a que para ello se requiere tener certeza de que las líneas y puntos de control que se van a usar para el cooregistro, tienen que haber ocupado en la realidad la misma posición para las diferentes fechas de análisis, algo con lo que no se contaba para este caso.

Para el mapa de uso del suelo de 1972, que se utilizó en este trabajo, se generalizaron las clases de vegetación y uso del suelo delimitadas en el mapa correspondiente de INEGI, a escala 1:50,000, particularmente en lo referente a diversos tipos de bosques, por ejemplo de *Abies religiosa*, *Pinus*, *Quercus* y latifoliadas. Un aspecto importante a tomar en cuenta está en relación a las asociaciones de tipos de vegetación, así como a la presencia de áreas con vegetación secundaria dominante.

En el primer caso todas las áreas relacionadas con algún tipo de bosque o en cuya composición dominase esta categoría, fue considerada en tal clase "*bosque*", en el segundo caso a la clase vegetación secundaria se le asignó la categoría correspondiente a su tipo de vegetación original o potencial. El uso agrícola no fue diferenciado en temporal y de riego aunque por apreciación visual de los mapas fuente se asume una cobertura mayor de agricultura de temporal. En la categoría pastizal también se han agregado tanto los de carácter natural como los inducidos.

Un aspecto importante considerado en este trabajo, fue el explicar la causa, de que al comparar las dos temporalidades de uso del suelo mencionadas (1972-88), hubiese una reducción sustancial de áreas erosionadas, con respecto al área total de la cuenca. En 1972 fue del 1.2% y en 1988 del 0.7%. Después de revisar visualmente en la pantalla del SIG los sitios que presentaron esta situación, se concluyó que debido al criterio empleado al fotointerpretar áreas erosionadas, para la producción cartográfica de uso del suelo en INEGI, se están señalando en dicha cartografía espacios mayores en los cuales, por cobertura, no están erosionados en su totalidad, sino que dentro de ellos, algunas de sus porciones específicas presentan rasgos resultantes de procesos erosivos. Esto se puede demostrar al observar y comparar alternativamente las áreas erosionadas de las dos fechas en las Figuras 2.7 y 2.8, en la porción suroeste de la cuenca.

En cambio al realizar las delimitaciones visualmente en fotomapas a escala 1:10,000, los cuales proporcionan una mayor resolución espacial, es posible trazar con mayor certeza cuál es el área que en su totalidad es un rasgo o que presenta rasgos con extensión dominante de erosión. Como por ejemplo un conjunto de cárcavas, o bien áreas con presencia de erosión laminar, etc. Esto explica la reducción en el porcentaje de erosión mencionado.

Otro problema importante está dado por la no convergencia precisa de los límites de los polígonos que definen similares uso del suelo para las dos fechas mencionadas, es decir, al definir el mapa de diferencias de uso del suelo (Figura 2.9) existen algunas sobre todo en la porción centro norte de la cuenca

2.6 CONCLUSIONES

En general el comportamiento del cambio de uso del suelo en el lapso considerado, ha sido de ampliaciones de áreas de uso agrícola (ya existentes para la primera fecha del análisis), dentro de áreas boscosas. Esto es muy notable en la porción sur de la cuenca, en el área correspondiente a la comunidad de San Andrés de los Gama

Existieron diferencias de uso del suelo, de cualquier tipo en un 16.5% del total del área de la cuenca, esto es, el 84.5% del área permaneció con el mismo uso en el lapso mencionado. El tipo de cambio de uso de bosque a agricultura le correspondió un 37%, este es el mayor porcentaje dentro de las diferencias totales. Se localizan estos cambios principalmente en la porción sur de la cuenca.

El tipo de cambio de bosques a pastizales, inducidos o naturales, presentó un 15% del total de los cambios detectados. Las áreas en donde se presentó de manera más clara es en las porciones este, norte y noreste de la cuenca, esta última porción se encuentra dentro de los límites del Parque Nacional Nevado de Toluca.

Existieron problemas importantes al tratar de conjugar información de uso del suelo la cual fue interpretada y definida originalmente, con criterios y a escalas diferentes, el caso más crítico se presentó con la delimitación de áreas erosionadas en las dos fuentes de información. Otro problema que se presentó fue la no correspondencia de los límites de los polígonos que definen similares uso del suelo para los dos mapas en el lapso considerado.

Algunos de los cambios de uso del suelo y vegetación detectados en este trabajo se explican en primera instancia por la forma típica de apropiación y ampliación de la frontera agrícola y pecuario en relación al incremento de habitantes y a la reducción de la capacidad agrológica del suelo a causa de la degradación del mismo.

El método seguido basado en la organización, manejo y análisis de la información, en el contexto de un SIG, permitió conocer con precisión los sitios cuyos usos del suelo y tipos de vegetación han sido afectados por cambios en el lapso considerado de 16 años. Además sin el manejo de la información en ese contexto no hubiese sido posible hacer, de manera *manual* y/o *visual*, la cuantificación de superficies de diversos tipos, los cálculos de pendiente por áreas agrícolas, los diferentes *cruzamientos* entre los mapas utilizados, la integración y análisis de información con diferentes escalas, etc.



BIBLIOTECA
DR. JORGE A. VIVO

ESTUDIO DE CASO 3

Regionalización ecológica y ordenamiento territorial en el municipio de Los Cabos, Baja California Sur, México, utilizando un sistema de información geográfica.

RESUMEN

Se aplicó un enfoque geomorfológico para delimitar, en el contexto de un Sistema de Información Geográfica (SIG), las fronteras de unidades ambientales físicas. Estas unidades fueron consideradas como marco de referencia geográfico o espacial, para la definición de la aptitud de uso del suelo al interior del área en estudio. Para la regionalización ecológica se consideró una estructura jerárquica de clasificación, desde niveles de escalas generales a específicas. Se delimitaron 32 unidades geomorfológico-ambientales o *paisajes terrestres*. El uso del SIG para las funciones de recolección, introducción, organización y procesamiento de las bases de datos espaciales y de atributos, fue fundamental para interpretar y determinar los límites de las unidades ambientales físicas, particularmente en el *proceso interactivo de digitización en pantalla*. En este proceso, diferentes *capas* de información temática (mapas), fueron seleccionadas y sobrepuestas sobre el mapa de relieve sombreado, generado a partir del modelo digital del terreno. Utilizando el cursor de la tableta digitizadora, se trazaron en pantalla los límites de las unidades ambientales, al sobreponer y desplegar alternativamente sobre el mapa de relieve mencionado, los segmentos capturados de los mapas temáticos digitizados con anterioridad. De esta manera se delimitaron cinco sistemas ecogeográficos y 32 paisajes terrestres, cada uno de ellos con una base de datos tabular asociada. Los resultados finales permitieron agrupar a las unidades ambientales, en cuatro conjuntos en función de sus diferentes aptitudes de uso del suelo. La información fue procesada en ILWIS, un SIG instalado en computadora personal AT.

3.1 INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

El Gobierno de México y la Organización de los Estados Americanos (OEA) firmaron un acuerdo de cooperación técnica para la ejecución de proyectos de ordenamiento ecológico de regiones geográficas con actividades productivas prioritarias. En ese acuerdo la Dirección General de Normatividad y Regulación Ecológica de la SEDUE (hoy SEDESOL) fungió como organismo responsable de la ejecución del proyecto y el Departamento de Desarrollo Regional y Medio Ambiente de la OEA actuó como responsable de la asistencia técnica.

Dicho acuerdo tiene como objetivo fundamental, llevar a cabo proyectos de manejo del territorio en regiones geográficas prioritarias para actividades productivas. Los resultados finales de la investigación general fueron realizados por un equipo de trabajo interdisciplinario con participantes de diferentes instituciones.

En este contexto se inserta el estudio de ordenamiento ecológico, urbano y turístico del municipio de Los Cabos, Baja California Sur, el cual tuvo como objetivo más general la elaboración de un instrumento de planeación ambiental, dirigido a la evaluación y programación del uso del suelo y del manejo de los recursos naturales (SEDUE-OEA, 1992).

De acuerdo a la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, el *ordenamiento ecológico* de un territorio es un proceso de planeación dirigido a evaluar y programar el uso del suelo y el manejo de los recursos naturales así como para la preservación de la naturaleza (Diario Oficial, enero 28 de 1988). De acuerdo a lo anterior el ordenamiento ecológico es la base para la regulación de las actividades productivas en relación a la aptitud de uso del suelo.

Parcialmente, los antecedentes de este trabajo se encuentran en el *Estudio de Ordenamiento Ecológico para Actividades Turísticas y Urbanas del municipio de Los Cabos, Baja California Sur* (ver el documento completo y sobre todo los anexos en SEDUE-OEA, 1992).

3.1.1 Regionalización ecológica

Uno de los puntos iniciales y principales en la realización del ordenamiento ecológico de cualquier área del país, según el esquema metodológico de SEDUE (1988), es la delimitación de las unidades ambientales de mapeo o *regionalización ecológica*. El trabajo que se presenta aquí corresponde a esta primera fase del esquema de ordenamiento, además se integran los resultados de la caracterización de cada una de las unidades ambientales delimitadas. Finalmente, como complemento del trabajo, se presentan los resultados de integrar tales unidades en grupos de aptitud más apropiada para el uso del suelo, dentro de la fase de propuestas de *manejo* en el proceso general de planificación.

La regionalización ecológica consiste en la delimitación de fronteras de unidades de mapeo homogéneas en relación a los parámetros del medio ambiente biofísico. El objetivo de tal regionalización es, dentro del proceso de planificación, tener una base geográfica, que permita en fases posteriores, caracterizar, describir y agrupar estadísticamente sus propiedades ambientales, con el fin de establecer y proponer la mejor aptitud de uso del suelo, considerando primordialmente su uso actual y las características sociales y económicas de la población local.

Para la delimitación de las unidades ambientales físicas se consideraron los primeros cuatro de los cinco niveles jerárquicos de regionalización ecológica establecidos por SEDUE (1988), los cuales van de una escala general a una particular: 1. *zona ecológica*, 2. *provincia ecológica*, 3. *sistema ecogeográfico* y 4. *paisaje terrestre*. La quinta jerarquía *unidad natural* no fue considerada en este trabajo.

3.1.2 El enfoque geomorfológico

Existen otros enfoques los cuales han sido aplicados en actividades de evaluación de problemas del medio ambiente, así como en la delimitación de unidades ambientales. Ejemplos muy conocidos de estos enfoques son el Sistema australiano para Evaluación de Tierras SCIRO o bien el enfoque que utiliza los conceptos de la ecología del paisaje (ver un estudio amplió sobre estos enfoques en Tricart y Kilian, 1982:17-37).

El enfoque geomorfológico que se ha aplicado para describir o caracterizar y delimitar unidades ambientales de mapeo, ha sido reconocido por muchos autores como la estrategia más útil para la delimitación de unidades ambientales físicas. Además se considera como una de las principales fuentes de información para el entendimiento integral del medio ambiente, con fines de planificación del uso de los recursos naturales de un país (Verstappen, 1977, 1983; Cooke y Doornkamp 1978; Tricart y Kilian, 1982; Verstappen y Van Zuidam, 1991; Van Zuidam y Van Zuidam, 1979; Bocco, 1986, 1990; etc.).

El enfoque geomorfológico ha sido utilizado en diversas disciplinas relacionadas con la evaluación de los recursos naturales e investigaciones sobre medio ambiente, particularmente durante las últimas dos décadas. En este contexto es posible distinguir a la *geomorfología ambiental* como la disciplina principal en relación a la posibilidad de aplicabilidad de la geomorfología como ciencia (Verstappen, 1983). En esa disciplina se han establecido relaciones estrechas a partir de las ligas existentes entre los aspectos ecológicos del paisaje entre la geomorfología y las disciplinas conexas, o bien con los elementos o parámetros individuales del paisaje.

Este trabajo se ha basado parcialmente en la metodología del Sistema de Levantamiento Geomorfológico establecida por el ITC (*International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences*, Enschede, The Netherlands), particularmente en el aspecto relacionado con las evaluaciones sistemáticas para realizar un mapeo geomorfológico sintético. Considerando este tipo de mapeo como el resultado de los estudios geomorfológicos conducidos hacia el establecimiento de las relaciones ecológicas del paisaje, entre las características de las formas del relieve y otros factores ambientales. Este tipo de análisis geomorfológico del territorio se lleva a cabo en el contexto de la determinación de información sintética la cual se aplica en un esquema de análisis multidisciplinario del territorio (Verstappen y Van Zuidam, 1991:3).

3.1.3 Objetivos

El objetivo general del estudio de *ordenamiento ecológico* mencionado, es la elaboración de un instrumento de planeación ambiental, dirigido a la evaluación y programación (proposición) del uso del suelo y del manejo de los recursos naturales en el municipio de Los Cabos, Baja California Sur.

El objetivo de este trabajo es el de presentar el método y los resultados finales de la aplicación de los criterios de la geomorfología analítica y sintética (morfogénesis, morfometría, morfografía, morfodinámica, etc.) para la delimitación de las unidades ambientales físicas o de *regionalización ecológica* dentro del contexto de un sistema de información geográfica (SIG). Se consideran a estas unidades como el principal marco de referencia geográfico o espacial, que puede ser usado con fines de la determinación de aptitudes de uso del suelo.

Además se presentan los resultados finales de la aplicación del criterio geomorfológico mencionado, para la delimitación de unidades ambientales de mapeo o regiones ecológicas en el caso del municipio de Los Cabos. Los resultados de este estudio se utilizaron como base para proponer políticas de manejo de recursos naturales para el municipio mencionado, en relación con el ordenamiento ecológico en el territorio mexicano (SEDUE-OEA, 1992).

3.1.4 Hipótesis

El enfoque geomorfológico para la delimitación de unidades ambientales o ecológicas es un criterio válido para los estudios de regionalización ecológica en el ámbito del ordenamiento territorial.

Es posible definir similitudes y diferencias importantes entre las diversas unidades geomorfológico-ambientales, en base a la aplicación de técnicas de *cálculo con mapas e interactivas Usuario-SIG*, que permitan el análisis geomorfológico en relación a las homogeneidades-heterogeneidades de variables físicas y bióticas.

3.2. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA EN ESTUDIO

El área en estudio se localiza en la región de El Cabo, en la porción sur de la Península de Baja California (ver mapa de localización en la Figura 3.1), entre los 22°50' y 23°45' de latitud norte y los 109°25' y 110°15' de longitud oeste. Tiene una extensión de 4,768 km², la cual corresponde al 22% del área total del estado de Baja California Sur. Dicha superficie corresponde a una extensión mayor a la del municipio de Los Cabos. El límite continental del área en estudio coincide con el del extremo norte de algunas de las unidades ambientales delimitadas durante el proceso de regionalización (límite norte en el modelo de relieve sombreado de la Figura 3.1).



Figura 3.1 Localización del área en estudio y unidades ambientales físicas desplegadas sobre el mapa de relieve sombreado.

3.2.1 Medio ambiente biofísico

Los tipos de clima en el área en estudio son principalmente *cálidos* (desértico BW con 51% del área, y secos, BS0 con 27% y BS1 con 18%) con temporada de lluvias en el verano (los porcentajes en esta sección son con respecto al área total de estudio). La lluvia anual promedio en los piedemontes, las planicies aluviales y la Sierra de La Trinidad tienen intervalos entre 250 y 350 mm (52%), y en las porciones más altas de La Sierra de La Laguna entre 600 a 750 mm (3%) (ver localización de las sierras y planicies en la Figura 3.2, y los mapas temáticos correspondientes, en las figuras del Apéndice C). Los valores de intervalos de isotermas van del dominante de 22° a 24°C (64%), enseguida el de >24°C (13%), hasta el intervalo de menor cobertura <18°C (4%). Los intervalos de altitudes van desde la altitud cero (nivel medio del mar) hasta los 2100 msnm (desde la línea de costa hasta la cresta de la Sierra de La Laguna).

Con respecto a las características morfométricas del relieve en el área en estudio se pueden considerar los siguientes valores para tener una idea de su heterogeneidad relativa a tales parámetros:

El 37% del área en estudio se localiza en el intervalo de altitudes de 0 a 200 msnm, un 35% de 200 a 500 msnm, el 12% entre 500 y 800 msnm, 8% entre 800 y 1100 y sólo un 3.2% del área total está sobre los 1400 msnm.

Con respecto al intervalo de pendientes en grados un 36% del área total está entre los 0° a 2°, un 20% de 2° a 4°. Estos valores caracterizan las planicies aluviales, los piedemontes y las áreas adyacentes a las colinas. Un 13% del área está en el intervalo de 16° a 32° y un 1% en el de 32° a 68°, estos dos intervalos caracterizan las laderas montañosas de la Sierra de La Laguna y algunas laderas de la Sierra de La Trinidad.

En relación a los valores azimutales de la orientación o exposición de las laderas (aspecto), no existe un intervalo dominante, los que tienen mayor cubrimiento son con exposición hacia el sur (27% del área total) y hacia el este (27%).

Las características geológicas (litología y cronoestratigrafía) dominantes por cubrimiento de superficie en el área en estudio son: granodioritas y tonalitas del Cretácico (38% del área de estudio), depósitos conglomeráticos del Cuaternario (18%) y granitos del Cretácico (11%). Las unidades geomorfológicas (morfoestructuras) más representativas son: sierras de rocas cristalinas del Cretácico al Paleógeno, pedimentos de rocas cristalinas y montañas de rocas volcánicas del Terciario, sistemas de mesetas de sedimentos marinos de plataforma del Plioceno, piedemontes disecados y planicies aluviales del Plioceno al Cuaternario.

Los tipos de suelos de mayor cobertura en el área de estudio son los regosoles (50%) y litosoles (44%), de acuerdo a la clasificación de FAO, estos cubren a los piedemontes y sierras, respectivamente. En áreas pequeñas se localizan sitios con fluvisoles (6%) en planicies aluviales.

Con respecto a los tipos de vegetación dominantes estos son: selva baja caducifolia (49% con respecto al área total de estudio) y el matorral sarcocaula Subinerme (34%). La primera sobre laderas de montañas bajas, medias y altas, y la segunda sobre los piedemontes y colinas. Comunidades de bosque de pino y encino se localizan solamente en las porciones más altas de la Sierra de La Laguna (6%). En el área de estudio existen un gran número de especies endémicas, particularmente en la Sierra de La Laguna, resultado esto del aislamiento biogeográfico que ha tenido la región desde hace aproximadamente 14 millones de años. Este aislamiento ha permitido no sólo la evolución de un gran número de endemismos, sino que también funciona como refugio de muchas poblaciones (Arriaga y Ortega, 1988).

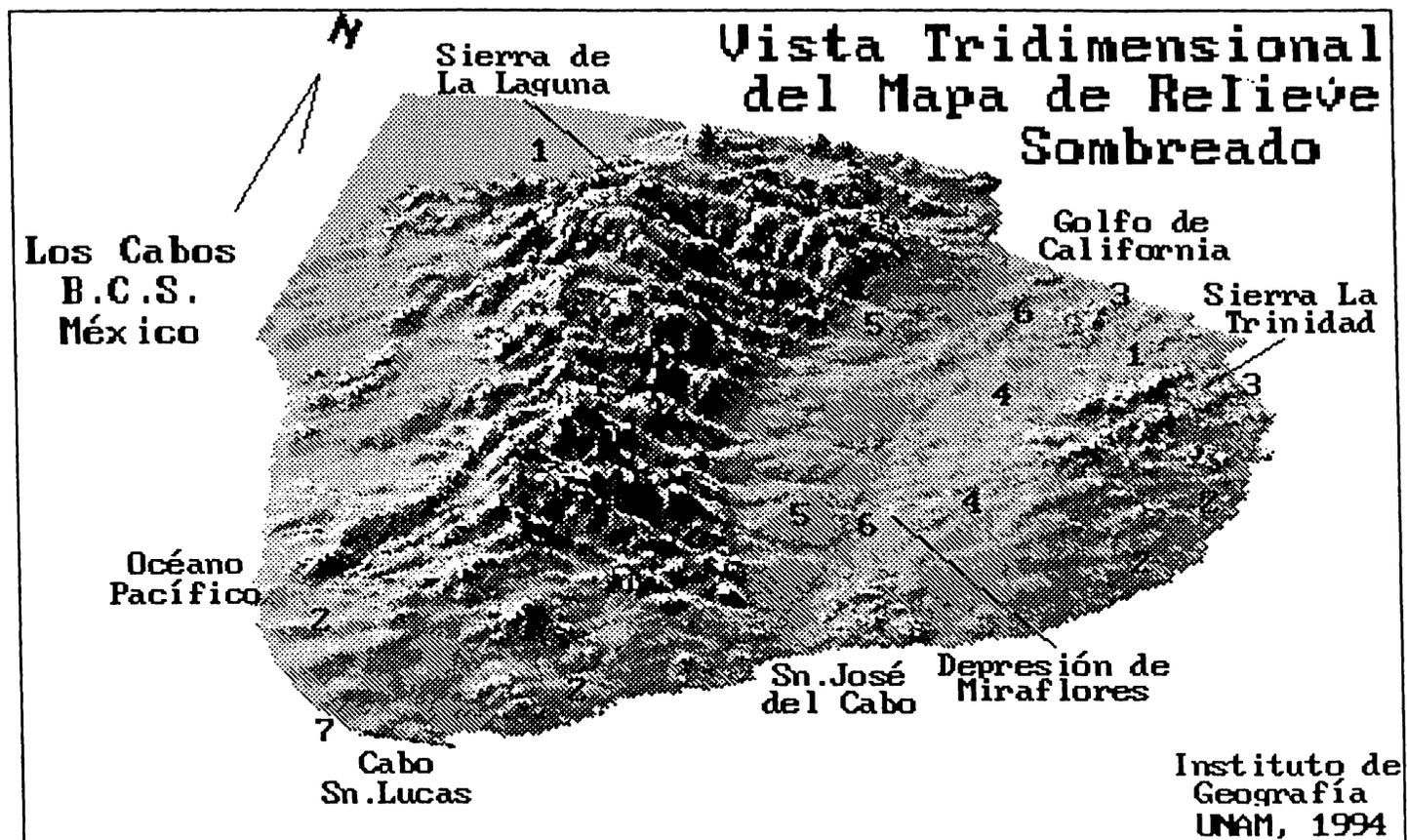


Figura 3.2 Vista tridimensional del mapa de relieve sombreado se han señalado aquí las principales unidades morfológicas (ver clave de las unidades en el texto).

3.2.2 Medio ambiente humano

La Región del Cabo posee una gran cantidad de atractivos naturales. De acuerdo a eso, recursos públicos del gobierno federal y estatal, así como inversiones privadas han financiado, sobre todo en los últimos 15 años, proyectos en la rama de actividades turísticas y en el área de pesca deportiva y deportes marinos. Estas han sido las actividades económicas ejes del desarrollo de esa región y han contribuido significativamente dentro del valor de la producción total en el estado (SEDUE-OEA, 1992:5-6).

Otras actividades económicas aunque de menor importancia por el valor de su producción son: la ganadería y la agricultura. Estas actividades están restringidas en la actualidad a valores bajos de productividad, mercados escasos y manejos inadecuados de los productos hacia los consumidores. Existe un *corredor turístico* entre las dos principales ciudades de esa región, San José del Cabo y Cabo San Lucas. Este corredor es el área turística y urbana más grande en el municipio, además de ser considerado como un polo de crecimiento turístico.

El corredor turístico de San José del Cabo-Cabo San Lucas es la zona con mayor actividad turística dentro del área en estudio. Este corredor abarca a las poblaciones de San José del Cabo y Cabo San Lucas, consideradas como centros urbanos y polos turísticos, más cinco poblaciones conurbadas. Además existen otros asentamientos humanos que están ligados entre sí por la Carretera Transpeninsular y por algunos tramos de carreteras estatales y caminos rurales.

3.3 ANTECEDENTES GEOMORFOLÓGICOS

Existen algunas referencias acerca de las características geomorfológicas en el área en estudio. Hammond (1954) describió y sistemáticamente mapeó los principales sistemas de geofomas (regiones y tipos) dentro de la Región de El Cabo. Córdova (1988) ha reportado una descripción geomorfológica de la Sub-Provincia de las Sierras del Cabo, e hizo un diagrama morfoestructural para el mismo sitio. De acuerdo con Lugo y Córdova (1992) el área en estudio pertenece a la Sub-Provincia Geomorfológica de Montañas de Rocas Cristalinas del Sur de Baja California. Esta unidad tiene un valor máximo de densidad de disección (o de drenaje) de 4 km/km² y un valor máximo de profundidad de la disección de 750 m.

De acuerdo con Hammond (1954) y Córdova (1988), las unidades morfológicas principales en el área de estudio son (los números corresponden con las unidades morfológicas señaladas en la Figura 3.2):

1. Montañas bloque de rocas cristalinas, principalmente granitos, del Cretácico al Paleógeno. En esta unidad están incluidas las sierras de La Laguna (Foto 3.1) y La Trinidad (Foto 3.2). En sentido transversal al eje de la Sierra de La Laguna se localizan gran cantidad de cauces intermontanos *encañonados*, controlados estructuralmente por la dirección de las fracturas y fallas que va de *WNW* al *ESE* (Foto 3.5).
2. Pediplanos en rocas cristalinas del Paleógeno. En los piedemontes al este y sur de la Sierra de la Trinidad (Foto 3.6) y al poniente y sur de la Sierra de La Laguna.
3. Montañas bajas de rocas volcánicas del Neógeno, en la porción extrema noreste de la Sierra de La Trinidad, al poniente y sur de Cabo Pulmo (Foto 3.7).
4. Planicies de levantamiento formadas por plataformas y terrazas de sedimentos marino del Neógeno (hacia el occidente de la Sierra de La Trinidad).
5. Piedemontes disecados del Neógeno-Cuaternario (hacia el este de la Sierra de La Laguna, Foto 3.3).



Foto 3.1 Laderas S y SW de la Sierra de La Laguna, formada por montañas bloque de rocas cristalinas (paisaje 050710). Note los valles intermontanos *encañados*.



Foto 3.2 Laderas occidentales de la porción sur de la Sierra de La Trinidad (paisaje 050107), en primer plano la planicie aluvial del Río San José (050304).

BIBLIOTECA
 DR. JORGE A. VIVO



Foto 3.3 Planicie aluvial del Río Pocitos (050302) a 3 km al suroeste de la localidad La Rivera. Note la inclinación del piedemonte de izquierda a derecha de la foto.



Foto 3.4 Planicie del Río Migriño (paisaje 050502), al fondo las estribaciones sur de la Sierra de La Laguna. Planicie formada sobre el pediplano en rocas cristalinas al poniente de la sierra.



Foto 3.5 Cañon de San Dionisio dentro de la Sierra de La Laguna (paisaje 050711). Note la inclinación de las paredes del cauce y las condiciones rocosas de su lecho.



Foto 3.6 Lomerío cercano a la costa, 10 km hacia el NE de San José, dentro del amplio piedemonte que desciende hacia el suroeste de la Sierra La Trinidad (paisaje 050106).



Foto 3.7 Lomeríos y montañas bajas de rocas volcánicas del Neógeno, en la porción extrema noreste de la Sierra de La Trinidad, al poniente de Cabo Pulmo, en la unidad 050104.



Foto 3.8 Campo de dunas litorales del Cuaternario, dentro del paisaje 050503, a 5 km al poniente de Cabo san Lucas, en el área de Cabo Falso.

6. Planicies aluviales del Cuaternario, principalmente en la Depresión de Miraflores (Fotos 3.2 y 3.3), aunque también se localizan algunas de menores dimensiones al norte de Cabo San Lucas y al poniente de la Sierra de La Laguna (Río Migriño, Foto 3.4).

7. Campos de dunas costeras del Cuaternario, principalmente hacia el oeste de Cabo San Lucas (Foto 3.8).

Nota: En el caso del término *pediplano* se ha considerado su significado como la fusión de *pedimentos* de cuencas fluviales contiguas. Los pedimentos son un conjunto de superficies de nivelación levemente inclinadas (3° a 5°) en la base de las elevaciones montañosas, algunas veces cubiertos por capas finas de materiales no consolidados y con relictos de denudación y presencia de barrancos, son un tipo específico de *piedemonte* (Lugo, 1989:158-164).

3.4 CONCEPTOS: TÉRMINOS Y JERARQUÍAS

De acuerdo con SEDUE (1988), el ordenamiento ecológico del territorio consiste en las siguientes cuatro fases. La primera está relacionada con la delimitación de unidades ecológicas o ambientales. La segunda corresponde con la caracterización de los principales componentes ambientales en relación con los aspectos naturales, sociales y económicos. La tercera fase consiste en la realización de un diagnóstico ambiental, con el cual es posible identificar los principales usos del suelo, la evaluación de la mejor aptitud de uso del suelo mediante la aplicación de técnicas estadísticas (análisis multivariado) y la definición de los modelos conceptuales. La última fase incluye la propuesta de políticas de uso del suelo y gestión, para cada unidad de paisaje delimitada.

El objetivo de este trabajo está relacionado exclusivamente con la primera fase mencionada. Sin embargo se presentan al final de las conclusiones, los resultados obtenidos en fases posteriores con el propósito de mostrar y aclarar la utilidad del enfoque geomorfológico empleado, para la realización de las propuestas de planificación *ecológica* de los recursos en el contexto del ordenamiento territorial.

Como antes se dijo, para la delimitación de las unidades ambientales, se consideraron en este trabajo los primeros cuatro de los cinco niveles jerárquicos de regiones ecológicas. Estos fueron establecidos a partir de un enfoque de escala de lo más general a lo particular, desde *zona*, *provincia*, *sistema* hasta *paisaje*. Estos niveles (sobre todo los dos primeros), fueron caracterizados y definidos para el país, por la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología en 1988 (ver la estructura jerárquica general en la Tabla 3.1). La quinta jerarquía *unidad natural* es en la que se considera mayor detalle espacial y en información temática, no fue considerada en este trabajo, sobre todo debido a la carencia de información con resolución suficiente y además por los objetivos del trabajo, los cuales consideran que el estudio debía ser expedito y general en esa etapa.

Se han definido cuatro zonas ecológicas para todo el país: 1. *Zona Árida*, 2. *Zona Templada*, 3. *Trópico Subhúmedo* y 4. *Trópico Húmedo*, delimitadas principalmente por medio de criterios de clasificación climática, sobre la base de la correspondencia entre las grandes zonas climáticas del país y las principales estructuras geológicas (1^{er} nivel Tabla 3.1). El área específica de estudio corresponde a la *Zona Ecológica Árida* (SEDUE, 1988:102).

El segundo nivel corresponde al de *provincia ecológica*. Existen 88 provincias ecológicas para todo el país, delimitadas mediante criterios de caracterización fisiográfica (2^{do} nivel Tabla 3.1). El área en estudio pertenece en su totalidad a la *Provincia Ecológica número 05*, conocida como *El Cabo* (SEDUE, 1988:104).

Tabla 3.1 Estructura jerárquica de la regionalización ecológica con fines de ordenamiento territorial.

Enfoque para Delimitación de Unidades	Nivel de Jerarquía (General a particular)	Número de Unidades para todo el país	No.de Unidades este trabajo
Climático	Zona Ecológica	4	1
Fisiográfico	Provincia Ecológica	88	1
Geomorfológico Morfoestructural principalmente	Sistema Eco-geográfico	1813 (No definitivo)	5
Geomorfológico Morfogenético principalmente	Paisaje Terrestre	No Delimitado	32
Geomorfológico Morfodinámico principalmente	Unidad Natural	No Delimitado	No Delimitado

El tercer nivel en la jerarquización de la regionalización ecológica, es el de *sistema ecogeográfico o terrestre*. De acuerdo con SEDUE (1992:9-13) existen alrededor de 1813 unidades para todo el país. Estas fueron delimitadas sobre la base de características ambiguas, no definidas claramente, de fisiografía y topoformas, aunque se menciona someramente una mayor importancia del patrón geomorfológico (misma evolución y origen, SEDUE, 1988). En esta tesis se propone la utilización del criterio geomorfológicos morfoestructural principalmente, y morfogenético secundariamente, para la delimitación adecuada de estas unidades, a este nivel (3^{er} nivel Tabla 3.1). El área en estudio se conforma de cinco sistemas ecogeográficos o terrestres:

Sistema 0501 *Sierras y Piedemonte La Rivera*,
 Sistema 0503 *Piedemonte y Planicies Aluviales Sn. José-Santiago-Buenavista*,
 Sistema 0504 *Piedemonte y Planicie Aluvial San José del Cabo*,
 Sistema 0505 *Piedemonte y Colinas La Tinaja*,
 Sistema 0507 *Sierras y Cañones San Lázaro*.

El cuarto nivel, último en este estudio, es el de *Paisaje Terrestre*. Este tampoco es definido claramente en las líneas a seguir establecidas por SEDUE (1988). En este trabajo se ha propuesto el dar mayor importancia al criterio geomorfológico morfogenético primariamente y al morfodinámico secundariamente para su delimitación (4^o nivel Tabla 3.1). Para el área en estudio y como resultado de este trabajo, se delimitaron 32 paisajes terrestres, el método empleado se explica en las siguientes páginas.

El último nivel en la jerarquización propuesta por SEDUE, no fue considerado en este trabajo. Es el de *unidad natural*. Este nivel corresponde a la delimitación de unidades ambientales de mayor detalle, para lo cual han recomendado el uso de información temática entre las escalas 1:10,000 a 1:50,000. En esta tesis se propone, para este nivel, que el criterio principal de clasificación sea el

geomorfológico-dinámico (5° nivel Tabla 3.1)

Considerando la anterior jerarquización de unidades ambientales físicas es importante señalar los siguientes aspectos, como parte de la discusión en relación a los lineamientos que ha establecido SEDUE como guía, para la delimitación de regiones ecológicas (unidades ambientales).

En la referencia general de SEDUE (1988), no se especifican claramente los procesos para delimitar unidades en los diferentes niveles particularmente en los de mayor detalle espacial: sistema ecogeográfico, paisaje terrestre y unidad natural. En ese documento se parte de un concepto de *topoformas* el cual es de carácter muy general y en el que se confunden y mezclan diversas escalas de análisis y delimitación de unidades geomorfológicas.

Los conceptos que se usan en los lineamientos establecidos por SEDUE, utilizan criterios de caracterización del relieve desde una perspectiva de la fisiografía, la cual considera al relieve de manera estática, sin tomar en cuenta, sobre todo, a los procesos modeladores, actuales y pasados, los cuales dieron origen y le dan dinámica a las formas. Aquéllos son conceptos ya superados en el análisis de las formas del relieve.

Se mezclan diversos niveles, escalas de detalle, aún cuando existen desde hace muchos años diversos niveles taxonómicos de clasificación del relieve precisos y para diversas amplitudes espaciales y temporales de caracterización de unidades (ver Tricart (1965), Dikau (1989:52-53), Coque (1984), Verstappen y Van Zuidam (1991:34-36)).

No se consideran los enfoques geomorfológicos actuales y solo se hace un esbozo de las características meramente topográficas, sin considerar origen, evolución, morfología, morfodinámica, morfoestructura, etc., conceptos básicos que son actualmente considerados dentro de la ciencia geomorfológica.

Es por estas razones que se propone este enfoque geomorfológico para la delimitación de las unidades ambientales y además se consideran los aspectos básicos para realizar el mapeo geomorfológico sintético y analítico, como se ha mencionado anteriormente.

3.5 METODOLOGÍA

La definición y delimitación de unidades ambientales se basó principalmente en los criterios establecidos en el *Manual de Ordenamiento Ecológico del Territorio* editado por la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (1988), aunque con las consideraciones que se han mencionado en párrafos anteriores, en algunas áreas se tuvieron que utilizar algunos otros criterios planteados en la bibliografía buscada sobre el tema, o bien en la cartografía geomorfológica existente.

En SEDUE (1988:97-111) se establece la *Técnica No.2* para realizar la regionalización ecológica en los diversos niveles de detalle. De esta parte del documento se han extraído algunas ideas que permiten definir los criterios generales utilizados en la delimitación de los sistemas y paisajes terrestres del municipio de Los Cabos, B.C.S.

En ese documento se plantea que el objetivo de tal regionalización es el de "Dividir el *Area de Ordenamiento Ecológico (AOE)* en unidades ambientales con características similares, tomando como base criterios ecológicos, lo que ofrece una estructura que permite el análisis jerárquico y sistemático del territorio nacional y homogeneiza la recopilación de información, a través de una base de datos geográfica" (SEDUE, 1988:97).

Se plantea también que la regionalización ecológica debe hacerse mediante una metodología que tome en cuenta un enfoque paisajístico o morfológico, "...la técnica requiere información sobre

elementos físicos del medio, como son: clima, geomorfología, hidrología, vegetación y edafología, principalmente (Barajas *et.al.*, 1986)".

3.5.1. Sistema de Información Geográfica

Un sistema de información geográfica es una tecnología que permite el coleccionar, guardar, recuperar, combinar, procesar y transformar diferentes clases de bases de datos espaciales o georreferenciadas y no espaciales o de atributos. En este contexto, el SIG es la herramienta más útil para la aplicación del enfoque geomorfológico en la delimitación de unidades ambientales físicas. El método utilizado en este trabajo ha sido simplificado en la Figura 3.3, la cual muestra un diagrama metodológico de flujo de los procesos del enfoque geomorfológico aplicado.

La información fue procesada en *ILWIS (Integrated Land and Water Information System, ITC The Netherlands)* un SIG instalado en computadora personal del tipo AT. Este sistema integra: 1. Una bases de datos espacial en formato vectorial (datos de segmentos), 2. Una bases de datos en formato *raster* o celdas (cálculo con mapas y procesamiento de imágenes digitales) y 3. Una base de datos tabular (usada durante el procesamiento de unidades de mapeo, sus atributos y sus valores digitales de pixeles) (Verstappen y Van Zuidam, 1991:12).

3.5.2 Descripción del método empleado

En los siguientes párrafos se hará una descripción de los pasos seguidos en el proceso de delimitación de unidades ambientales físicas.

Los escasos datos existentes (mapas y reportes antecedentes) acerca de aspectos geomorfológicos del área de estudio así como de unidades ambientales principales y de escalas mayores, fueron consultados y compilados. Se hizo revisión bibliográfica-cartográfica y se colectó información antecedente publicada, sobre todo relacionada con estudios geomorfológicos realizados sobre el área en estudio. También se revisaron los aspectos teóricos del mapeo de unidades de paisaje desde un punto de vista morfológico, esto con el fin de tener claras las definiciones y conceptos de los elementos del paisaje que se analizarían y delimitarían.

En una fase inicial de análisis (ver Figura 3.3), se utilizó a partir de procedimientos de interpretación visual sobre imágenes LANDSAT MSS (banda 7) impresas en papel fotográfico a la escala aproximada de 1:1,000,000 y luego introducidas al SIG mediante digitización óptica (*scanner*), con ellas fue posible delimitar las principales unidades morfoestructurales y morfogenéticas en el área de estudio. Después se generó un mapa preliminar de unidades morfogenéticas, más detallado, usando la cartografía topográfica 1:250,000. Una versión cartográfica final del mapa preliminar se elaboró a partir de la cartografía topográfica 1:50,000 y la geológica 1:250,000.

Un acercamiento inicial al área en estudio, se realizó a partir de una primera salida, para hacer trabajo de campo de reconocimiento, en diciembre de 1991. Esto permitió tener un primer conocimiento directo de las características físicas, biológicas, sociales y económicas de la Región de *El Cabo*.

Utilizando una impresión cartográfica a escala 1:250,000 de las unidades de provincias ecológicas y sistemas terrestres o ecogeográficos (archivo digital proporcionado por SEDUE y digitizado originalmente a escala 1:1,000,000), se establecieron los primeros rasgos, en el área en estudio, que definirían tales unidades.

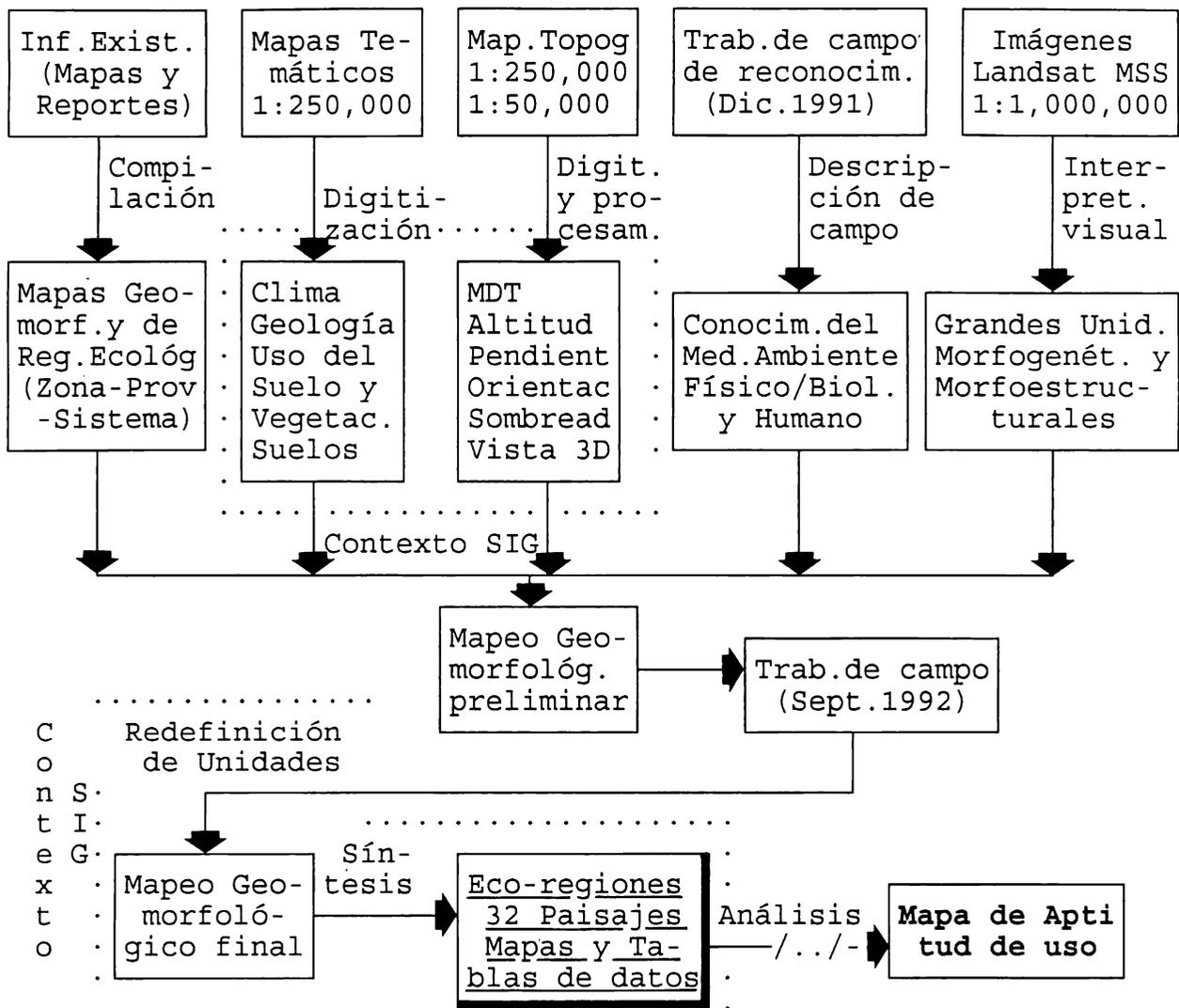


Figura 3.3 Diagrama metodológico de la aplicación del enfoque geomorfológico para la delimitación de unidades ambientales físicas.

Esta primera delimitación fué cotejada con la información altitudinal (curvas de nivel) impresa en la carta topográfica San José del Cabo, editada a escala 1:250,000 por el INEGI (1981), es decir se trató de respetar en primera instancia la delimitación de sistemas y provincia propuesta por SEDUE para esta porción de México (Ver SEDUE, 1988:102-104). Sin embargo en fases posteriores se modificaron y precisaron los rasgos que delimitan las unidades ambientales mencionadas, de acuerdo a la información más detallada con que se contó para este trabajo.

Una vez que se definieron a detalle los sistemas terrestres que existen en el área en estudio, se procedió a hacer una delimitación preliminar de las unidades de paisaje terrestre. Se utilizó la información altitudinal de la carta topográfica escala 1:250,000 y la información de las variables ambientales del medio físico y biológico plasmada en la cartografía temática mencionada. Para todos los casos de delimitación de paisajes, la información geológica, edafológica y de tipos de vegetación principalmente, fue importante para tener elementos de corroboración en el trazado de las líneas que definen los límites de unidades.

En una segunda etapa se utilizaron todas las cartas topográficas escala 1:50 000 del área de estudio, quedando delineadas a mucho mayor detalle las unidades de paisaje. El procedimiento básico en esta fase consistió en evaluar cualitativamente las características de la geometría del relieve con base en el análisis de las características de la información topográfica, de las curvas de nivel (con equidistancia a cada 20 m), para estimar así diferencias morfológicas que fuesen inferibles a partir de la inclinación de las laderas (valor de pendiente), asimismo del conjunto de las formas y trayectorias de las curvas de nivel mencionadas.

Las curvas de nivel de los mapas topográficos (escalas 1:250,000 y 1:50,000) fueron digitizadas, con equidistancia vertical a cada 100 m, en las áreas con mayor inclinación de las laderas montañosas y a cada 20 m, en planicies aluviales y costeras (ver el mapa de relieve sombreado en la Figura 3.1 y la Figura C.1 del Apéndice C). El archivo de segmentos de las curvas de nivel mencionadas (en formato vectorial) fue *rasterizado* y posteriormente interpolado linealmente para generar el Modelo Digital del Terreno o DTM, por sus siglas en idioma inglés (ILWIS, 1992; para una documentación amplia sobre el tema consulte a Waibel y Heller, 1991:269-297).

Un DTM es una representación digital de una porción (o del total) de la superficie de la Tierra. En un sentido más general, un DTM puede ser usado como un modelo digital de cualquier superficie continua con valores individuales en el terreno (ejemplo de esto puede ser la cantidad de lluvia, temperatura o características de suelos, etc.). Los DTM son las bases de datos numéricas con mayor aplicación para modelar las características del relieve.

Dentro del ambiente SIG, los DTM proporcionan información oportuna para modelar, analizar y desplegar fenómenos relacionados con la geomorfología. El DTM generado fue procesado, con las posibilidades funcionales del SIG empleado, para crear diferentes mapas con características geométricas del relieve, usando principalmente funciones de *filtrado de convolución lineal* y tablas de clasificación para el agrupamiento de píxeles. Se generaron mapas de intervalos tanto de altitudes, de pendientes, de azimuth de exposición de laderas (aspecto u orientación) como de relieve sombreado, vistas tridimensionales (ILWIS, 1992; ver las Figuras 3.1, 3.2 y del Apéndice C las Figuras C.2 a C.6). El tamaño de pixel empleado en todos los mapas y análisis realizados fue de 204 m. Se determinó esa dimensión con el fin de aprovechar las mayores posibilidades que daba el despliegue gráfico en la pantalla del SIG (640 columnas x 480 filas).

Se digitizaron en ILWIS los siguientes mapas temáticos publicados a escala 1:250,000, por el INEGI: Uso del suelo y vegetación, edafología, litología y cronoestratigrafía, efectos climáticos (mayo-octubre), efectos climáticos (noviembre-abril); tipos de clima (escala 1:500,000), isotermas y lluvia total anual promedio. Esta información se utilizó, como se menciona antes, para la realización de cruzamientos y sobreposiciones (ver las Figuras C.7 a C.14 del Apéndice C y las referencias bibliográficas de la cartografía temática consultada para este trabajo en la parte final de

la bibliografía).

La aplicación del SIG en las funciones de colección, organización, recuperación, procesamiento y transformación de las bases de datos espaciales y no-espaciales, fue útil en la delimitación de las unidades geomorfológico-ambientales. Un paso importante en la aplicación de la metodología, fue la *fase interactiva Usuario/SIG*, utilizando la función denominada *digitización en pantalla (screen digitizing)* y teniendo al mapa de relieve sombreado, generado con el modelo digital del terreno (*MDT*), como *imagen de fondo* y los segmentos delimitadores de las unidades temáticas de mapeo (uso del suelo y vegetación, geología, edafología, características climáticas, etc.) como capas de sobreposición desplegadas alternativamente (individualmente o en conjunto) sobre el mapa de relieve mencionado.

Esta función del SIG empleado permite la delimitación digitizada de segmentos en la pantalla (monitor), a partir del uso del cursor de la tableta digitizadora, sobre un mapa raster empleado como *imagen de fondo* (una imagen que es *desplegada* sobre el monitor de la computadora; ILWIS, 1992:). En este proceso diferentes clases de información temática (*capas*) fueron seleccionadas y sobrepuestas sobre el mapa de relieve sombreado.

Una segunda salida a campo se realizó en septiembre de 1992, con el fin de corroborar la delimitación de las unidades geomorfológico-ambientales preliminares. En un análisis geomorfológico posterior se realizó la delimitación final de ellas. Además en esta salida se colectaron, en 47 sitios de muestreo, información geomorfológica y ejemplares botánicos la cual fue útil en la delimitación final. Dichos sitios están distribuidos en la mayor parte del área estudiada. Un trabajo referente a las características florísticas de los sitios muestreados se ha presentado preliminarmente en (Villers-Ruiz *et al.*, 1993).

En el mapa de vegetación y uso del suelo (Figura C.7) incluido en el Apéndice C se han agregado las posiciones (ubicación de los sitios con las cruces y números impresos) de los 47 sitios de corroboración en campo, en los cuales se hicieron las colectas y revisiones mencionadas.

Siguiendo el método establecido por Van Zuidam (1991:17-34) se obtuvo de manera sistemática información tanto de las características geomorfológicas como de otros aspectos (litología, erosión, uso del suelo y tipo de vegetación, etc.) para cada unidad ambiental. La Tabla 3.2 muestra un ejemplo de *tarjeta de descripción geomorfológico-ambiental* realizadas para cada uno de los 32 paisajes terrestres delimitados. Los valores en porcentaje de algunas de las variables consideradas en estas tarjetas, se obtuvieron de las bases de datos obtenidas en el SIG (ver tablas en el Apéndice C).

Las unidades de paisaje terrestre fueron entonces *cruzadas*, dentro del SIG, con respecto a los diversos mapas temáticos, esto con el fin de obtener una base de datos digital, la cual describiese numéricamente los porcentajes de área y cobertura de cada clase temática para cada paisaje (ver Tablas C.1 a C.10 del Apéndice C).

Las unidades de mapeo de paisaje y su correspondiente base de datos, junto con otros datos socioeconómicos y bióticos, condujeron en fases posteriores, mediante técnicas de análisis multivariado, a definir las aptitudes de uso del suelo más apropiadas en relación con un enfoque de planificación ambiental del territorio (ver Apéndice C).

3.6 RESULTADOS

Los resultados de este estudio fueron básicos para la definición de las propuestas de políticas de manejo de los recursos naturales para el municipio de *Los Cabos*, B.C.S., en relación al Ordenamiento Ecológico del Territorio Mexicano (SEDUE-OEA, 1992).

Tabla 3.2 Tarjeta de Descripción geomorfológico-ambiental para caracterizar las unidades de paisaje terrestre. Fuente:modificado de Bocco (1986:14).

<p>1.Unidad de mapeo (Clave y Nombre): 050103 Sierra La Trinidad (Laderas denudatorias, Graníticas y Volcánicas).</p>
<p>2.Morfogénesis/Edad: <i>Relieve Endógeno (Denudacional/Intrusivo y Volcánico)/Cretácico a Paleógeno).</i></p>
<p>3.Morfometría: 3.1 Altitud Máxima: 780 m. 3.2 Altitud Mínima: 20 m. 3.3 Amplitud del Relieve: 760 m. 3.4 Inclinación de las laderas: 8.5° 3.5 Long.de Ladera:--- 3.6 Steepness/Clase de Relieve: <i>Moderad.Abrupto/Colinas-Montañas.</i> 3.7 Expos.de ladera: Norte (14%)*, Oeste (14%). Sin una orientación dominante.</p>
<p>4.Morfografía: 4.1 Situación Topográfica: <i>Laderas Bajas.</i> 4.2 Forma de ladera: <i>Plano/Convexa.</i> 4.3 Acomodo Espacial (Unidades Super./Unid.Inferiores): <i>Laderas Intrusivo-Volcánicas/Planicies</i></p>
<p>5.Morfodinámica: 5.1 Erosión (Tipo/Intensidad): <i>Cárcavas y Barrancos/Severa</i> 5.2 Remoción en Masa (Tipo/Intensidad): <i>Flujo de detritos y caída de bloques/Moderado</i></p>
<p>6.Morfoestructura:<i>Montañas Bloque de Rocas Cristalinas(Granito, Cretác-Paleógeno)/Montañas Bajas de Rocas Volcánicas (Neógeno).</i></p>
<p>7.Morfohidrología: 7.1 Dens.de Disec.: 3.2 km/km² 7.2 Patrón de Drenaje: <i>Radial.</i> 7.3 Procesos Hidrológ.de Ladera: <i>Flujo Laminar</i></p>
<p>8.Meteorología y Clima: 8.1 Temp.Media Anual (°C): 22-24 (100%) 8.2 Lluvia (total anual mm): 250-275 (87%). 8.3 Lluvia (May-Oct mm) 175-250 (100%). 8.4 Lluvia (Nov-Abril mm): 50-75 (100%). 8.5 Tipo de Clima (Köppen modif.) <i>Bw (100%) Muy Seco y Muy Cálido (Lluvias de verano).</i></p>
<p>9.Tipo de Roca: 9.1 Substrato/Edad: <i>Granito/K-Pg (56%)/Vulcano-clastos/Mioceno (29%).</i> 9.2 Depósitos Superficiales: <i>Localmente Intemperizados.</i> 9.3 Fracturamiento/Fallam.: <i>Moderado/Moderado.</i></p>
<p>10.Propieds.Suelo:10.1 Clase Dominante FAO:<i>Litosol (59%)/Regosol (42%).</i> 10.2 Prof(cm):<i>0-5/0-22.</i> 10.3 Text:<i>Limo-aren/Areno-limosa</i></p>
<p>11.Uso suelo/Vegetación: <i>Selva Baja caducif. (82%)/Matorral (16%)</i></p>

*LOS VALORES ENTRE PARENTESIS CORRESPONDEN A LOS PORCENTAJES EN RELACION AL TOTAL DE LA UNIDAD DE MAPEO.

Se delimitaron cinco sistemas ecogeográficos y 32 paisajes terrestres, cada uno de ellos con una base de datos tabular asociada (ver Apéndice C). En la Figura 3.4 se muestran la distribución de los 32 paisajes terrestres cuyos límites han sido delineados por medio del método descrito en páginas anteriores. El número en el interior de cada unidad corresponde con los dos últimos dígitos de la clave completa de cada paisaje. Cada uno de los cinco sistemas ecogeográficos ha sido simbolizado y diferenciado con un tono de gris correspondiente (ver leyenda de la Figura 3.4). En la Tabla 3.3 se muestra una síntesis de los datos obtenidos en el ambiente SIG para cada uno de los paisajes terrestres (descripción física y de vegetación-uso del suelo).

En el Apéndice C se han incluido algunas tablas las cuales resultaron de realizar, mediante la función de *cruzamiento* en el SIG, del mapa de las 32 unidades geomorfológico-ambientales con respecto a cada uno de los mapas temáticos correspondientes. El objetivo de incluir tales tablas en el Apéndice C, fue para caracterizar las homogeneidades al interior de cada paisaje y sus heterogeneidades con respecto a otras unidades. Esto en relación a sus propiedades particulares y coberturas en valores de porcentaje con respecto al valor total de superficie de las unidades ambientales individuales.

A continuación se hace una descripción con respecto a las características geomorfológicas de cada uno de los sistemas ecogeográficos o terrestres delimitados:

Sistema 0501 *La Rivera*. Sierras y Piedemonte, incluye los paisajes terrestres 050101 al 050107.

Este sistema se localiza en la porción este del municipio, comprende tanto a la Sierra de la Trinidad como a la serie de piedemontes que convergen al Golfo de California y al conjunto de llanuras aluviales localizadas al pie de la Sierra de La Laguna. Considerando la información cartográfica morfogenética (Lugo y Córdova, 1991), la porción norte de este sistema está formada por montañas y elevaciones menores esencialmente del Plioceno-Cuaternario con alturas relativas de más de 600 m, son montañas plegadas en estructura de cabalgadura, constituidas por rocas mesozoicas.

El origen de la parte central de esta unidad es de montañas y elevaciones menores esencialmente del Plioceno-Cuaternario con estructura de bloque de rocas intrusivas y metamórficas de edad mesozoica, con alturas relativas menores a 600 m. El origen de la porción sur de este sistema es de márgenes montañosas y zonas transicionales de edad Cuaternaria, se trata esencialmente de superficies de piedemontes erosivos de diversa composición litológica y origen, formados por la nivelación de elevaciones montañosas.

La parte norte de este sistema, en el área comprendida entre Buenavista y La Rivera se encuentran planicies bajas formadas en el cuaternario, marginales a sistemas montañosos, particularmente con terrazas marinas pleistocénicas no diferenciadas. En el área oeste existen también mesetas de edad esencialmente plioceno-cuaternarias producidas por el movimiento de bloques y condicionadas por el sustrato rocoso, son de alturas relativas menores a 600 m, de carácter estructural en rocas sedimentarias mesozoicas o paleogénicas.

Dentro del mapa de morfoestructuras de Córdova (1988), se establece la existencia en este sistema de mesetas de sedimentos marinos de plataforma, piedemontes disecados, depósitos de aluvión (planicies aluviales), sierras de rocas cristalinas, pedimentos en rocas cristalinas y elevaciones de rocas volcánicas (ver algunos parámetros particulares para cada paisaje terrestre en las Tablas 3.3 y 3.4 y la localización de los sistemas y paisajes en la Figura 3.4).

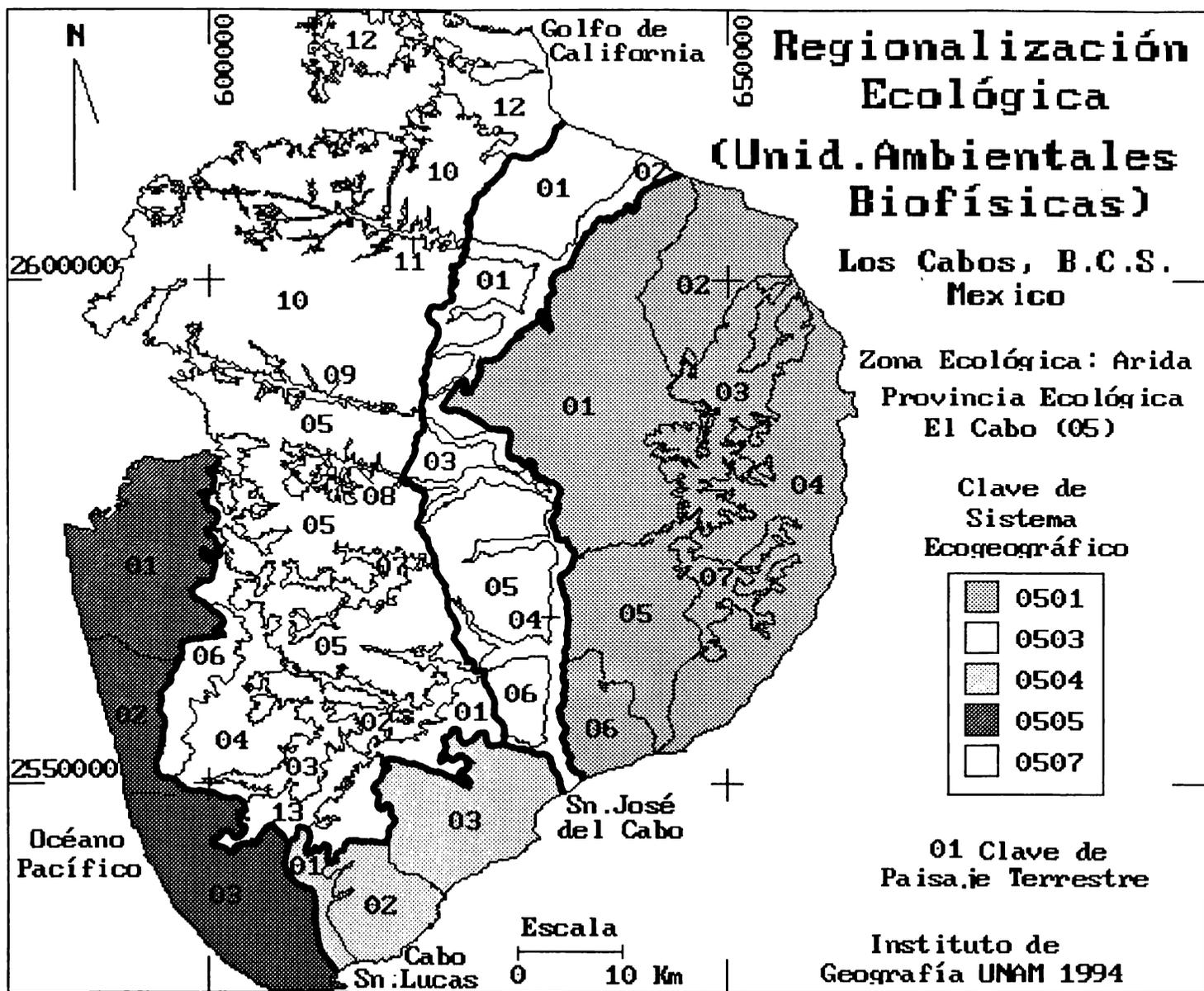


Figura 3.4 Mapa de unidades ambientales físicas, sistemas ecogeográficos y paisajes terrestres. Cada uno de los sistemas se ha diferenciado con un tono de gris particular y los límites de los paisajes se han marcado en el interior de cada sistema.

Tabla 3.3 Descripción biofísica de las unidades de paisaje terrestre (ver su localización en la Figura 3.4).

Paisaje Terrestre	Unid. Geomorf.	Sup km ²	Alt Max	Alt Min	Pend° Media	Temp °C	Interv. Lluv.mm	Geología	Clase Suelo	Vegetación
050101	Pm	457	600	1	1	23	250-275	Tpl(lu-ar)	Regosol	MSSi
050102	Pm	143	517	1	1	23	125-250	Q(cg)	Regosol	MSSi
050103	Hs	154	780	20	8	23	250-275	T(Gr)/Tm(Vc)	Litosol	SBC
050104	Pm	339	600	1	4	>24	250-275	K(Gr)/Q(cg)	Regosol	MSSi
050105	Pm	176	514	1	1	23	250-275	K(Gr)/Tpl(lu-ar)	Regosol	MSSi
050106	Pm/Hs	75	200	1	4	>24	250-275	K(Gd)	Litosol	SBC
050107	Hs	56	500	129	3	>24	250-275	K(Gr)	Regosol	SBC
050301	Pm	204	500	1	2	23	275-350	Q(cg)	Regosol	MSSi
050302	API	74	326	1	1	23	275-350	Q(al)	Fluvisol	MSSi/Vr
050303	Pm	36	500	150	3	23	275-350	Q(cg)	Regosol	SBC
050304	API	102	400	1	1	23	275-350	Q(al)	Fluvisol	SBC/MSSi
050305	Pm	151	458	80	2	23	275-350	Q(cg)	Regosol	MSSi
050306	Pm	40	300	36	2	23	275-350	Q(cg)	Litosol	MSSi
050401	API	34	384	1	1	23	275-350	Q(al)	Fluvisol	MC
050402	Pm/Hs	90	400	1	4	>24	250-275	K(Gd-Tn)/T(Gr)	Regosol	SBC
050403	Pm	177	539	1	4	23	250-275	T(Gr)	Regosol	SBC
050501	Pm/API	221	600	1	3	23	250-275	K(Gr)	Regosol	MSSi
050502	Pm/Hs	82	384	1	4	23	250-275	M(Met)/K(Gr)	Regosol	MSSi
050503	Pm	224	500	1	3	23	250-275	T(Gr)	Regosol	MSSi
050701	Mnt	96	1000	120	13	23	350-450	K(Gd-Tn)	Litosol	SBC
050702	IMVal	55	900	120	8	21	350-450	K(Gd-Tn)	Litosol	SBC
050703	Mnt	75	1400	200	13	23	350-450	K(Gd-Tn)	Litosol	SBC
050704	ErVPm	169	1000	96	7	23	350-450	K(Gd-Tn)	Litosol	SBC
050705	Rg/Cny	455	1910	180	17	21	450-600	K(Gd-Tn)	Litosol	SBC
050706	Mnt	61	900	174	8	23	275-350	K(Gd-Tn)	Litosol	SBC
050707	IMVal	37	1150	200	9	19	350-450	K(Gd-Tn)	Litosol	SBC
050708	Cny	20	1433	363	12	19	450-600	K(Gd-Tn)	Litosol	SBC
050709	Cny	23	1450	384	10	19	450-600	K(Gd-Tn)	Litosol	SBC
050710	Rg/Cny	701	2100	190	15	23	450-600	K(Gd-Tn)	Litosol	SBC
050711	Cny	27	1900	200	11	18	350-450	K(Gd-Tn)	Litosol	SBC
050712	Pm/Hs	148	900	1	5	23	125-250	Q(cg)/K(Gd-Tn)	Regosol	SBC
050713	VPm/Hs	48	700	263	4	23	350-450	K(Gd-Tn)	Regosol	SBC

Clave Unidades Geomorfológicas 2a Colum. Pm= Piedemonte, Pm/Hs= Piedemonte y Colinas, Hs= Colinas, API= Planicie Aluvial, Pm/API= Piedemonte y Planicie Aluvial, Cny= Cañón, Mnt= Montañas, Rg/Cny= Sierras y Cañones, IMVal= Valles Intermontanos, ErVPm= Valles erosivos en Piedemonte, VPm/Hs= Valles en Piedemontes y colinas. **Clave Geología:** K(Gd)= Cretácico (Granodiorita), K(Gd-Tn)= Cretácico (Granodiorita-Tonalita), K(Gr)= Cretácico (Granito), M(Met)= Mesozoico (Complejo Metamórfico), Q(al)= Cuaternario (Depósitos Aluviales), Q(cg)= Cuaternario (Depósitos Conglomeráticos), T(Gr)= Terciario (Granito), Tm(Vc)= Mioceno (Dep. Volcanoclásticos), Tpl(lu-ar)= Plioceno (Depósitos de lutitas y Areniscas). **Clave Vegetación:** MSSi= Matorral Sarcocaula Subinerme, SBC= Selva Baja Caducifolia, Vr= Veget. Ripariana, MC= Matorral Crasicale.

Sistema 0501 Sierras y Piedemonte "La Rivera", incluye los paisajes 050101-07. **Sistema 0503** Piedemonte y Planicies Aluviales "Sn. José-Santiago-Buenavista", incluye los paisajes 050301-06. **Sistema 0504** Piedemonte y Planicie Aluvial "San José del Cabo", incluye los paisajes 050401-03. **Sistema 0505** Piedemonte y Colinas "La Tinaja" incluye los paisajes 050501-03. **Sistema 0507** Sierras y Cañones "Sn. Lázaro" incluye los paisajes 050701-13.

Tabla 3.4 Clave, nombre, superficie y porcentaje con respecto al total del área en estudio, para cada uno de los paisajes terrestres delimitados.

Clave	Nombre	Sup.km ²	%*
050101	Mesa El Machete-Loma Larga	457.24	9.59
050102	Punta Colorada-Mesa Las Vinoramas	143.83	3.02
050103	Sierra La Trinidad	154.43	3.24
050104	Cabo Pulmo La Fortuna	339.41	7.12
050105	Ríos El Peyote-Palo Escopeta	176.67	3.71
050106	Sta. Catarina-Cerros La Laguna	75.80	1.59
050107	Cerros Las Palmas-La Joya	56.60	1.19
050301	Mesa El Cuero	204.57	4.29
050302	Planicie Río San Dionisio	74.63	1.57
050303	Mesa Los Difuntos	36.61	0.77
050304	Río San José	102.27	2.15
050305	Mesa Santa Anita	151.86	3.19
050306	Mesa San Bernabé	40.44	0.85
050401	Planicie Río El Salto	34.99	0.73
050402	Cerros La Palmillita-Colorado	90.65	1.90
050403	San José-El Bledito	177.29	3.72
050501	Cerros El Palmar-Piedra Blanca	221.06	4.64
050502	Cerro La Cruz-Río Migriño	82.73	1.74
050503	Cabo San Lucas-Cerro Prieto	224.30	4.70
050701	Cerros Blanco-El Cenicero	96.58	2.03
050702	Río San Lázaro	55.65	1.17
050703	El Picacho-Las Animas	75.83	1.59
050704	Mesa Verde-San Vicente	169.93	3.56
050705	Guayparin-Salsipuedes	455.20	9.55
050706	Cerros La Sierrita-La Calabaza	61.23	1.28
050707	Río La Palma	37.47	0.79
050708	Portezuelo	20.38	0.43
050709	Cañon San Bernardo	23.93	0.50
050710	Sierras La Victoria-La Soledad	701.66	14.72
050711	Cañon San Dionisio	27.82	0.58
050712	Mesa El Pescadero-Río Sn. Bartolo	148.15	3.11
050713	La Vinatería-El Saucito	48.34	1.01
Total		4767.55	100.0

* VALOR EN PORCENTAJE DE CADA PAISAJE TERRESTRE CON RESPECTO AL TOTAL DEL AREA EN ESTUDIO.

Sistema 0503 Sn. José-Santiago-Buenavista. Piedemonte y Planicies Aluviales, incluye los paisajes terrestres 050301 al 050306.

Este sistema se localiza en la porción central del municipio de Los Cabos, morfogenéticamente comprende una serie de planicies bajas, formadas en el cuaternario, marginales a sistemas montañosos y de carácter acumulativo fluvial (ríos San José, San Jorge, Agua Caliente, San Pedro, A.Verde, La Palma, etc.). En la porción oeste de este sistema (al pie de la Sierra de La Laguna) se encuentran algunas mesas de edad esencialmente Plioceno-Cuaternarias producidas por el movimiento de bloques y condicionadas por el sustrato rocoso, son de alturas relativas menores a 600 m, de caracter estructural en rocas sedimentarias mesozoicas o paleogénicas.

Con respecto a las morfoestructuras se tienen piedemontes disecados del Neógeno-Cuaternario

limitados por el escarpe este de la Sierra de La Laguna y una serie de Planicies acumulativas aluviales del cuaternario (ver Tablas 3.3 y 3.4 y Figura 3.4).

Sistema 0504 *San José del Cabo*. Piedemonte y Planicie Aluvial, incluye los paisajes terrestres 050401 al 050403.

Este sistema se localiza en la porción sur del municipio. Su origen geomorfológico está dado por la presencia de márgenes montañosas y zonas transicionales de edad Cuaternaria. Son esencialmente superficies de piedemontes erosivos, de diversa composición litológica y origen, formados por la nivelación de elevaciones montañosas compuestas de bloques graníticos.

Las morfoestructuras principales son de pedimentos en rocas cristalinas del Paleógeno, estribaciones marginales de la sierra cristalina (Cretácico-Paleógeno) de La Laguna y algunas planicies aluviales acumulativas del Cuaternario (ríos El Salto, El Tiburón, El Tule, etc., ver Tablas 3.3 y 3.4 y Figura 3.4).

Sistema 0505 *La Tinaja*. Piedemonte y Colinas, incluye los paisajes terrestres 050501 al 050503.

Este sistema se localiza en la porción suroeste del municipio, morfogenéticamente se caracteriza por la presencia de márgenes montañosas y zonas transicionales de edad Cuaternaria. Son esencialmente superficies de piedemontes erosivos de diversa composición litológica y origen, formados por la nivelación de elevaciones montañosas. Existen también en el área sur de este sistema, planicies bajas formadas en el Cuaternario, marginales a sistemas montañosos de carácter acumulativo y de origen eólico (campos de médanos o dunas costeras).

Las morfoestructuras principales son de pedimentos en rocas cristalinas del Paleógeno, estribaciones marginales de la sierra cristalina (Cretácico-Paleógeno) de La Laguna y planicies aluviales acumulativas del Cuaternario (ríos San Venancio, San Jacinto, El Gaspareño, Mígríño, etc.). Como se mencionó antes existe en este sistema una planicie costera baja, formada por dunas costeras del Cuaternario. (ver Tablas 3.3 y 3.4 y Figura 3.4).

Sistema 0507 *San Lázaro*. Sierras y Cañones, incluye los paisajes terrestres 050701 al 050713.

Este sistema se localiza en la porción oeste, noroeste y norte del municipio de Los Cabos, morfogenéticamente corresponde montañas y elevaciones menores esencialmente del Plioceno-Cuaternario con alturas relativas de más de 600 m. Tienen estructura de bloques de rocas intrusivas y metamórficas esencialmente del Mesozoico, una serie de fracturas han controlado la presencia de *cañones* profundos con dirección transversal a la trayectoria general de La Sierra de la Laguna

Las morfoestructuras principales son las series de sierras de rocas cristalinas del Cretácico-Paleógeno y las superficies de nivelación de las porciones superiores de los bloques intrusivos (áreas más altas de la sierra mencionada).

Es importante aclarar para el caso del paisaje 050704 se ha utilizado el término valles erosivos en piedemonte con el fin de señalar con mayor énfasis el conjunto de rasgos de erosión lineal integrados en la parte sur de este paisaje. Dichos rasgos muestran profundidades de disección mayores, a las del resto de los paisajes delimitados en esa zona del municipio (a partir de la apreciación visual de esos rasgos en los mapas topográficos correspondientes), lo que evidencia

una mayor actividad erosiva fluvial del Cuaternario, concentrada en una red que cubre parte del piedemonte (ver Tablas 3.3 y 3.4 y Figura 3.4).

3.7 CONCLUSIONES

Las principales conclusiones que han surgido de la aplicación de la metodología propuesta, aplicándola en el contexto de un SIG, se plantean en los siguientes párrafos:

1. El enfoque geomorfológico morfogenético para unidades de paisaje terrestre y el morfoestructural para sistemas terrestres, fue fundamental para la delimitación de las unidades ambientales físicas, debido a que por su sólida coherencia teórico metodológica, basada en la ciencia geomorfológica (analítica y sintética), permitió avalar, desde un punto de vista fisisocioambiental, las propuestas de ordenamiento ecológico territorial (planificación del uso de los recursos naturales).

2. La aplicación del SIG en las funciones de colección, organización, recuperación, procesamiento y transformación de las bases de datos espaciales y no-espaciales, fue útil en la delimitación de las unidades geomorfológico-ambientales. Principalmente en la *fase interactiva Usuario/SIG*, utilizando la función denominada *digitización en pantalla* y teniendo al mapa de relieve sombreado, generado con el modelo digital del terreno (MDT), como *imagen de fondo* y los segmentos delimitadores de las unidades temáticas de mapeo (uso del suelo y vegetación, geología, edafología, características climáticas, etc.) como capas de sobreposición desplegadas alternativamente (individualmente o en conjunto) sobre el mapa de relieve mencionado.

3. Los resultados de aplicar el enfoque geomorfológico permitieron definir e integrar cuatro grupos de unidades ambientales con diferentes aptitudes de uso del suelo. Esta fase se realizó en una etapa posterior a la considerada en este estudio (ver la sección C.1 del Apéndice C). La validación de la delimitación de las unidades ambientales se realizó también en etapas posteriores, ya que fue posible corroborar, a partir de la realización de un análisis en componentes principales, asignándole a cada una de dichas unidades ambientales, una caracterización física, biótica y socioeconómica, considerando para ello 57 variables, repartidas en diversos rubros: medio físico, medio biótico, producción, tenencia de la tierra, infraestructura, servicios, asentamientos humanos, población, educación, etc. El resultado de este análisis permitió establecer, que la variable de mayor influencia en la separación por grupos de unidades, fue la pendiente del terreno. Hay coincidencia general en decir que dicha variable es la fundamental para describir la geometría del relieve.

CONCLUSIONES GENERALES

A manera de conclusiones se pueden plantear ahora, algunos aspectos relevantes que han sido establecidos individualmente en cada una de las partes en que se ha dividido esta tesis. Posteriormente se establecerán algunas consideraciones sobre el uso de los SIG a futuro dentro de la temática mostrada en los estudios de caso, así como algunas propuestas finales para ser tomadas en cuenta en relación a los temas abordados.

De lo mencionado en la parte correspondiente a la introducción y conceptos generales relacionados con los SIG, se concluye que esta tecnología forma parte de un conjunto de herramientas útiles, cuando se aplican adecuadamente, en relación a los procesos de análisis espacial de objetos y fenómenos de diversa índole. La utilidad de un SIG se hace más importante conforme el volumen de datos y variables a considerar es más amplio y heterogéneo, así como el conjunto de funciones que necesitan ser aplicadas, son cada vez más complejas.

La definición de SIG más apropiada al enfoque que se ha utilizado en esta tesis, es la que los define en cuanto a la posibilidad de ser aplicados en asuntos relacionados con la toma de decisiones (planificación) y la solución de los problemas en el medio ambiente.

Se consideraron las dificultades más evidentes que se han presentado acerca de la definición de los SIG, es importante reconocer que muchos de los involucrados con el tema, le han dado a esa tecnología una orientación exclusivamente comercial, lo cual ha provocado que exista información exagerada o falsa, sobrevaloración y ocultamiento intencional de las dificultades y alcances reales que se pueden obtener cuando se trabaja con esa herramienta.

Las dificultades para definir a los SIG se hacen mayores debido al vertido de información contradictoria que utilizan muchos de los *consultores*, y a la existencia de amplias y variadas interpretaciones dadas a mismos elementos, funciones, nombres y conceptos, debido a la heterogeneidad de campos de aplicación y de usuarios.

El uso de un SIG no asegura por sí mismo que los resultados obtenidos y su interpretación sean correctos. Para definir esto se tiene que considerar primero: si es realmente necesaria la aplicación de esta tecnología, si los modelos a emplear en el análisis son teóricamente consistentes, si la información de las variables usadas es homogénea, tanto en calidad como en nivel de detalle, y finalmente, si los tipos y magnitudes de los errores sistemáticos involucrados son permisibles y no afectan en alto porcentaje a los resultados obtenidos.

Es fundamental tomar en cuenta el contexto de la organización donde se usa un SIG. Esto tiene relación directa con los objetivos de las instituciones, requerimientos y necesidades de planeación y manejo, entrenamiento del personal, características del equipo y sistema utilizado, etc.

Se consideró de una manera simplificada la función y el sitio que ocupa un SIG dentro de la estructura de organización, para las actividades de planificación del aprovechamiento de los recursos naturales y evaluaciones de cambios en el medio ambiente.

Se planteó la función que debe cumplir el SIG como base para el manejo e integración de la información, necesaria para dar elementos de juicio a los planificadores, para que a su vez ellos, de acuerdo a su modelo de planificación, establezcan prioridades y metas.

Se aclaró que la información que se utiliza en asuntos ambientales es compleja y voluminosa, e involucra la mayor parte de las disciplinas científicas. Debido a la diversidad de disciplinas, métodos de análisis y clases de información; la integración, análisis, captura, organización de los

datos, con fines de planificación ambiental es la más compleja y es en ese campo, en donde tal vez la aplicación de los SIG es la más clara en cuanto a las posibilidades de uso de las funciones de integración de información y de análisis espacial.

En relación a la clase de productos o de información de entrada que se usa comúnmente en análisis con SIG, se estableció que los productos de percepción remota son una fuente básica de datos, en relación a estudios e inventarios de recursos naturales,. Esto sobre todo con el fin de tener información fidedigna, actualizada y a suficiente detalle.

En el estudio de caso sobre evaluación del avance de la erosión en las cabeceras de las cárcavas, se hizo un aprovechamiento amplio y general del SIG, sobre todo en relación a una utilización integral de las posibilidades de uso, ya que se ha interactuado con sus funciones propias para integrar, comparar y analizar mapas, y además con las directamente relacionadas al procesamiento de imágenes digitales. También se propuso una opción metodológica, más precisa y de bajo costo, para la obtención de información espacial detallada de fenómenos dinámicos.

Las precisiones alcanzadas con el método propuesto en este trabajo superaron las alcanzadas con el método *tradicional* a partir de las mediciones directas hechas en campo. Se detectaron pérdidas de detalle en la configuración de los bordes y diferencias considerables en las cuantificaciones de superficies. La mayor desventaja que tiene el sistema videográfico de percepción remota es la baja resolución que proporciona una señal grabada de video, al ser reproducida desde un videocasete.

Los procesos de erosión acelerada de suelos, en los sistemas evaluados, presentaron cambios en las tasas de avance, en función del lapso considerado y de la etapa del año en que fueron tomadas las imágenes. Tampoco se presentaron homogéneamente en toda la cabecera, debido a la forma en como frecuentemente se evidencian estos procesos, a partir principalmente de la caída de *paquetes de suelo*.

Es posible aprovechar más ampliamente la información gráfica digital del terreno, procesándola dentro del SIG, debido a la oportunidad que representa el poder, clasificar y *trazar* rasgos sobre las imágenes, al fotointerpretar el usuario, con información monoscópica y estereoscópica, sobre el monitor de la computadora.

Una desventaja importante podría ser la extensión del terreno a registrar con imágenes de video de grandes áreas. Es decir el cubrimiento a detalle en un nivel regional, ocasiona que para ello sea necesario hacer consideraciones diferentes, en cuanto costos y logística, para la realización de los levantamientos videográficos correspondientes. Las posibilidades de aplicación de las imágenes de video, para hacer evaluaciones del terreno, son amplias, y están abiertas para ser utilizadas por diversas disciplinas

En el caso del Nevado de Toluca se analizaron algunos aspectos de vegetación y uso del suelo, en relación a las variables altitud, pendiente y tamaño de áreas de uso. En este caso fue evidente la utilidad del uso de las funciones de sobreposición, clasificación, *cruzamiento* y aplicación de columnas de información tabular a los mapas. En general el comportamiento del cambio de uso del suelo en el lapso considerado ha sido de ampliaciones de áreas de uso agrícola dentro de áreas de bosque. Algunos de los cambios de uso del suelo y vegetación detectados en este trabajo se explican en primera instancia por la forma típica de apropiación y ampliación de la frontera agrícola y pecuario en relación al incremento de demanda sobre los recursos. El método seguido basado en la organización, manejo y análisis de la información, en el contexto de un SIG, permitió conocer con precisión los sitios cuyos usos del suelo y tipos de vegetación han sido afectados por cambios.

Existieron problemas importantes al tratar de conjugar información de uso del suelo la cual fue interpretada y definida originalmente, con criterios y a escalas diferentes. Otro problema

importante se presentó debido a la no convergencia precisa de los límites de los polígonos que definen similares uso del suelo para las dos fechas de la información analizada.

En el ejemplo del caso 3 se hizo la aplicación del enfoque geomorfológico morfogenético, para unidades de paisaje terrestre y el morfoestructural para sistemas terrestres, fue fundamental para la delimitación de las unidades ambientales físicas, ya que por su sólida coherencia teórica metodológica basada en la ciencia geomorfológica (analítica y sintética), permitió avalar, desde un punto de vista físico-ambiental, las propuestas de ordenamiento ecológico territorial .

Se siguió un enfoque geomorfológico, con el cual se obtuvo, de una manera sistemática, información acerca de las características del relieve de las unidades ambientales. Las unidades de paisaje terrestre fueron *cruzadas*, dentro del SIG, con respecto a los diversos mapas temáticos, con el fin de obtener una base de datos digital, la cual describe numéricamente los porcentajes de área y cobertura de cada clase temática para cada paisaje.

En este estudio se usaron ampliamente los filtrados direccionales y la generación de perspectivas tridimensionales, en los modelos digitales de terreno, para la generación de modelos de relieve sombreado, con el fin de facilitar y aumentar las posibilidades de interpretación de las particularidades del relieve.

Los ejemplos de aplicación descritos muestran solamente algunas posibilidades de análisis de información espacial, otros aspectos del manejo de información, modelamiento y análisis pueden ser encontrados en la literatura especializada citada en este documento.

Un asunto fundamental en relación con lo bien o mal que se haya aplicado un SIG, es el causado por un desconocimiento de algunos usuarios, sobre aspectos básicos de cartografía. Particularmente en los asuntos relacionados con la transformación de proyecciones, las exactitudes, el tamaño más apropiado de las celdas o píxeles a emplear, en función de la escala original de la información; los problemas inherentes a la integración de información cartográfica de diferentes escalas, el problema de las sobreposiciones y las probabilidades de tener certeza en ese tipo de análisis. No olvidar un aspecto fundamental que es el de las precisiones, errores sistemáticos y aleatorios, exactitudes y por supuesto las equivocaciones.

Problemas de algunos posibles usuarios, ya que hay cierta reticencia a tomar en consideración esta tecnología. Los altos costos que conlleva la dependencia generalizada en los países pobres para conseguir tecnología, información y programas de computación.

Hay dos posiciones equivocadas en relación a establecer juicios acerca de los SIG. La primera es dada por personas que, en general, están mal informadas acerca del tema y piensan que van a tener resultados inmediatos, baratos y sin ningún esfuerzo al emplearlos. En la segunda posición se piensa que el usar un SIG es algo costoso, inútil y poco científico. Evidentemente estas son las dos posiciones extremas, ninguna de las dos es correcta. En la parte introductoria de esta tesis se han establecido los aspectos básicos para definir y entender esta tecnología

El asunto de los errores que se producen al analizar la información en un SIG, tiene muchas vertientes, por ahora basta decir que los aspectos relacionados con las sobreposiciones de mapas, presentan muchos aspectos a considerar en ese sentido.

La búsqueda de nuevas opciones en el análisis de la información en un SIG, al estar convencido de que se puede obtener un amplio provecho de su uso. Se debe tomar en cuenta, para obtener resultados exitosos, es necesario dedicar en la fase de inicio, una considerable cantidad de tiempo y recursos, tanto para la instalación, como para el aprendizaje y aplicación de dicha tecnología.

Como se menciona en alguna parte de la tesis, el ingenio, la experiencia, el conjunto de

concimientos de ciencias básicas que tenga el usuario y además la búsqueda continua (exploración) dentro de las funciones posibles a aplicar dentro de un SIG, nos dan la pauta para realizar aportes científicos empleando la herramienta geográfica señalada.

No hay que olvidar los altos costos que representa el comprar información, programas y entrenamiento en entidades extranjeras, muchas de ellas realizando sus actividades con fines exclusivos de lucro. Se debe pensar en generar tecnología propia y con costos accesibles. Existen algunas excepciones dentro de ellas, está el SIG conocido como IDRISI, que en opinión del autor es accesible tanto para su adquisición, aprendizaje y utilización.

Para terminar resulta importante mencionar, por un lado, las propuestas a futuro para continuar trabajando en el desarrollo, mejoramiento, recomendaciones y aplicación de los enfoques metodológicos, dentro de los estudios de caso que se han presentado en esta tesis.

En relación a la evaluación de procesos de pérdida de superficie de suelo debido a la erosión en cárcavas, es necesario considerar a futuro lo siguiente: Realizar un muestreo sistemático, en el que se involucre, para la explicación de los procesos erosivos, tanto las características de los suelos, como de las intensidades de lluvias durante las tormentas máximas. Considerar además la realización de un seguimiento sistemático de áreas amplias, registrando imágenes de video y de esta manera poder comparar, aplicando un mismo procedimiento, con respecto a la dinámica involucrada en otros sitios, los cuales deben tener características semejantes, tanto en litología, materiales edáficos, uso del suelo y formas de erosión.

Buscar una ampliación en la aplicación del método para tener la posibilidad de cuantificar volúmenes de suelo perdido, a partir de un conjunto amplio de puntos de control, con coordenadas conocidas en los tres ejes, y con la suficiente exactitud para realizar mediciones en el modelo estereoscópico formado con las imágenes de video, como se demostró en este trabajo.

Es necesario incorporar técnicas geoestadísticas y *sistemas expertos* para la determinación de unidades ambientales físicas, partiendo de una valoración cuidadosa de los resultados obtenidos y de la experiencia geomorfológica del usuario.

Es fundamental ampliar las posibilidades del método empleado, para que verdaderamente se tenga un procedimiento de delimitación de unidades ambientales, dentro de una estructura integrada de manejo y análisis de información, y dentro también de un proceso completo de ordenamiento territorial.

Aprovechar la posibilidad de crear *escenarios*, considerándolos como imágenes, mapas o escenas, resultantes de la aplicación de modelos geográficos predictivos en diferentes disciplinas, finalmente lo que muestran esas *instantáneas* son una expresión espacial resultante de un fenómeno generado por los procesos e interacciones de elementos y variables.

Por otro lado es importante abrir nuevos caminos en la aplicación de la tecnología de los SIG en otros campos, especialmente dentro de las disciplinas relacionadas con los estudios de aspectos del medio ambiente, con un énfasis particular en la geomorfología aplicada ambiental. Pero sobre todo hacer realidad la posibilidad de colaborar, demostrar y proponer, a los científicos que se han enfocado en estudios de las sociedades humanas y la economía, los niveles de análisis espacial que se pueden alcanzar en dichas disciplinas, al aplicar adecuadamente la tecnología de los SIG

Hay que establecer como meta académica a corto plazo, no sólo la integración de información de diversas disciplinas, sino sobre todo la integración de especialistas de diversas disciplinas, con el fin de que aporten su experiencia y propongan enfoques metodológicos más consistentes, y se logre verdaderamente una ciencia interdisciplinaria aplicada, sobre todo en los campos relacionados con las propuestas de inventario y manejo de los recursos, como en planeación ambiental.

Bibliografía

Aangeengrug, R.T. et.al (1992), **A Bibliographic Analysis of a Statewide Geographic Information Systems, 1970-1990**, Chicago, Council of Planning Librarian.

Aceves-Quesada, J.F.(1994) **Caracterización geomorfológica de los depósitos de nubes peleanas en el Nevado de Toluca**, Memoria de Resúmenes de la Tercera Reunión Nacional de Geomorfología, Guadalajara, Mayo, pp.7-8.

Albert, T.M. (1988) Knowledge-Based Geographic Information Systems (KBGIS): New Analytic and Data Management Tools. **Mathematical Geology**, Vol.20, No.8, pp.1021-1035.

Almelio, C.F. (1974) Charge-coupled devices, **Scientific American**, 230(2), 22-31, citado en Burrough, P. A. (1989) **Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment**, Clarendon Press, Oxford, 194 pp.

American Congress on Surveying and Mapping ACSM (1989) **Fundamentals of Geographic Information Systems**, American Congress on Surveying and Mapping, William J. (Editor), Bethesda, MD, USA.

American Society for Photogrammetry and Remote Sensing ASPRS (1987) **Geographic Information Systems for Resource Management, a Compendium**, Amer.Soc.for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, USA.

American Society for Photogrammetry and Remote Sensing ASPRS (1987) **Proceedings of The Eleventh Biennial Workshop on Color Aerial Photography and Videography in the Plant Sciences and Related Fields**, April 27-May 1, Weslaco, Texas. Editado por ASPRS, Bethesda, MD, USA.

American Society for Photogrammetry and Remote Sensing ASPRS (1988) **Proceedings of The First Workshop on Videography**, 19-20 May, Terre Haute, Indiana. Editado por ASPRS, Bethesda, MD, USA.

American Society for Photogrammetry and Remote Sensing ASPRS (1989) **Proceedings of The Twelfth Biennial Workshop on Color Aerial Photography and Videography in the Plant Sciences and Related Fields**, 23-26 May, Sparks, Nevada, 307 pp. Editado en 1990 por ASPRS, Bethesda, MD, USA.

Antenucci, John (1991) **Geographic Information Systems: A Guide to the Technology**, New York, Van nostrand Reinhold.

Arriaga, L. y Ortega, A. Eds.(1988) **La Sierra de la Laguna de Baja California Sur**, Centro de Investigaciones Biológicas de Baja California Sur, A.C., Publicación 1, 237 pp.

Aronoff, S. (1989) **Geographic Information Systems: A Management Approach**. WDL Publications, Canada.

ASPRS/ACSM/RT/92 (1992) **Proceedings of the ASPRS/ACSM/RT/92 Convention on Mapping and Monitoring Global Change**, Technical Papers in five volumes: 1.Global Change and Education, 2.Photogrammetry and Surveing, 3.GIS and Cartography, 4.Remote Sensing and Data Acquisition and 5.Resource Technology 92.

AU2 (1986) **Paquete General de Cartografía**, Manual del Usuario, pub. 84-AU2-03, GESA marzo 1986, 60 pp.

Ball, Desmond (1989) **Geographic Information Systems: Defence Applications**, Rushcutters Bay, NSW, Australia, Brassey's Australia.

Ballesteros-Tena, N.(1990) **Topografía**, Limusa-Noriega, 474 pp., México.

Barajas *et.al.* (1986) **Regionalización ecológica del territorio**, Serie Cuadernos Básicos No.4, Ordenamiento Ambiental, SEDUE, México. Citados en SEDUE (1988) Manual de Ordenamiento Ecológico del Territorio, Subsec.de Ecología, Direc.Gral.de Normatividad y Regul.Ecol., México, 97 pp.

Barba, L. y E.Linares (1990) La fotografía aérea desde globo en Teotihuacan, **Ciencia y Desarrollo**, Vol.16, No.93, pp.33-39.

Barret, L.R. and David P.Lusch (1992) **Assessing Ephemeral Gully Erosion Using Airborne CIR Videography**, Abstracts of Technical Program of 27th Int.Geograph. Congress, pp.36-37, Washington, D.C., August 9-14.

Belward, A.S. and C.R.Valenzuela (eds. 1991) **Remote Sensing and Geographical Information Systems for Resource Management in Developing Countries**, Kluwer Academic, The Netherlands.

Bennett, H.H. (1939) **Soil Conservation**, Mc Graw Hill, New York.

Blagovolin, R.W. and Tsvetkov, D.G. (1972) The use of repeated ground photogrammetric survey for studying the dynamics of slopes, **International Geography**, 1972-1, pp.9-10.

Bloomfield, K. and S.Valastro Jr.(1974) Late Pleistocene Eruptive History of Nevado de Toluca Volcano, Central Mexico, **Geological Society of America Bulletin**, Vol.85, pp.901-906.

Bloomfield, K. and S.Valastro Jr.(1977) Late Quaternary tephrochronology of Nevado de Toluca Volcano, Central Mexico, **Overseas Geol.Miner.Resour.**, Vol.46, 15 pp.

Blong, R.J. (1985) Gully sidewall development in New South Wales, Australia, Capítulo 54, pp.574-584, en El-Swaify, S.A., W.C.Moldenhauer and A.Lo (Editors) **Soil Erosion and Conservation**, Soil Cons.Soc.of Am.

Bocco, G. (1986) **Aspects of the Anthropic Erosion in Talpujahu River Basin Central Mexico: An Applied Geomorphological Approach**, M.Sc.Thesis, ITC, Enschede, The Netherlands.

Bocco, G. (1989) **El inventario de erosión antrópica: Acarcavamientos en la Cuenca del Río Talpujahu** Boletín del Instituto de Geografía, UNAM No.19, pp 55-68, México.

Bocco, G. (1990) **Gully erosion analysis using remote sensing and Geographic Information Systems; A case study in Central Mexico** PhD Thesis, ITC, Enschede, The Netherlands.

Bocco-Verdinelli, G., J.López-Blanco and L.M.Morales-Manilla (1990) Computer-assisted mapping of gullies: The spatial database for a Gully Information System, **ITC Journal 1990-1**, ITC-Enschede, The Netherlands, pp.45-50.

Bocco V., G., Palacio P., J.L., y Valenzuela, C.R. (1991) **Erosión en cárcavas en el Sistema Volcánico Transmexicano. Un modelo utilizando percepción remota, sistemas de información geográfica y análisis geomorfológico**, Investigaciones Geográficas Boletín del Instituto de Geografía de la UNAM, México.

Bocco, G.H.R. y Valenzuela, C.R. (1988), Integration of GIS and image processing in soil erosion studies using ILWIS, **ITC Journal 1988-4**. ITC-Enschede, The Netherlands, pp.309-319.

Bocco, G.H.R., Palacio-Prieto, J.L. y Valenzuela,C.R. (1989), **Geomorphological Mapping using SPOT Imagery for Gully Erosion Assessments, a Study Case in Central Mexico**, II International Conference on Geomorphology, Abstracts, Frankfurt.

Bocco, G.H.R., Palacio-Prieto, J.L. y Valenzuela,C.R. (1990), Gully erosion modelling using GIS and geomorphologic knowledge, **ITC Journal**, 1990-3. ITC-Enschede, The Netherlands, pp.253-261.

- Bocco, G.H.R. (1991) Gully erosion: Processes and Models, **Progr. in Physical Geography** 15,4(1991), pp.392-406.
- Boardman J., I.D.L.Foster and J.A.Dearing, Editors (1990) **Soil Erosion on Agricultural Land**, John Wiley and Sons, Chichester, 687 pp.
- Bobbe, T.J. and P.Ishikawa Jr. (1992) **Real Time Differential GPS: An Aerial Survey-Remote Sensing Application**, Technical Papers of The ASPRS/ACSM/RT 1992 Convention, Mapping and Monitoring Global Change, Volume 5 (Resource Technology 92), Washington, D.C. August 3-8 pp.108-116.
- Boodt, M.de and D.Gabriels, Editors (1980) **Assessment of Erosion**, John Wiley and Sons, Chichester, 563 pp.
- Bustamante, A. (1977) **Detección de áreas erosionadas mediante imágenes de satélite**, IBM, México.
- Burrough, P. A. (1989) **Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment**, Clarendon Press, Oxford, 194 pp.
- Cervantes-Zamora, Y. *et al.*(1991a) **Mapa de Clasificación de Regiones Naturales de México 1, Regionalización Física, Hoja IV-10.1**, Escala 1:16,000,000, Volumen Naturaleza, Atlas Nacional de México, Instituto de Geografía, UNAM.
- Cervantes-Zamora, Y. *et al.*(1991b) **Mapa de Clasificación de Regiones Naturales de México 2, Regionalización Física, Hoja IV-10.2**, Escala 1:4,000,000, Volumen Naturaleza, Atlas Nacional de México, Instituto de Geografía, UNAM.
- Clark, Michael (1992), **Waste location: spatial aspects of waste managememt, hazards, an disposal**, London, New York, Routledge.
- Conacher, A.J. and Dalrymple, J.B. (1977) The nine unit landsurface model: An approach to pedogeomorphic research **Geoderma**, 18:1-154.
- Cooke, R.U. and Doornkamp, J.C. (1978) **Geomorphology in Environmental Management: An Introduction**, Clarendon Press, Oxford, 413 pp.
- Coque,R. (1984) **Geomorfología**, Alianza Universidad Textos, Madrid, 475 pp.
- Córdoba F.de A., C.E.A. (1988) **Cartografía geomorfológica en escala pequeña del Occidente de la República Mexicana**, Tesis de Lic.en Geog., F.F.y L. de la UNAM, México, 127 pp.
- Dalrymple, J.B., Blong, R.J. and Conacher, A.J. (1968) An hypothetical nine unit landsurface model **Z.Geomorphol.**, 12:60-76.
- Demant A. (1978), Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación, **Revista del Instituto de Geología** 2(2), pp.172-187, UNAM.
- Demant A. 1981. **L'Axe néo-volcanique transmexicain. Etude volcanologique et pétrographique signification géodynamique**. Thèse. Université d'Aix-Marseille. 259 pp.
- Diario Oficial de la Federación (1988), **Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente**, 28 de enero, México.
- Dikau R. (1989) The application of a digital relief model to landform analysis in geomorphology, pp.51-77, **Three**

dimensional applications in geographic information systems, Edited by J.Raper, Taylor & Francis, London.

DSEI (1990a) Dirección del Sistema Estatal de Información, **Ortofotos de predios agrícolas, período 1988-89 escala 1:10,000** (19 hojas y base de datos), Gobierno del Estado de México.

DSEI (1990b), Dirección del Sistema Estatal de Información, **Ortofotos de predios forestales en explotación para 1989** escala 1:20,000 (8 hojas y base de datos), Gobierno del Estado de México.

Dirzo R. and M.C.García (1992) Rates of Deforestation in Los Tuxtlas, a Neotropical Area in Southeast Mexico, **Conservation Biology**, Vol.6, No.1, pp.84-90.

Donker N.H.W. and M.C.J.Damien (1984) Gully system development and an assessment of gully initiation risk in Miocene deposits near Daroca-Spain, **Z.Geomorphol.**, Suppl.Bd.49:37-50.

Dymond J.R. and D.L.Hicks (1986) Steepland erosion measured from historical aerial photographs, **Journal of Soil and Water Conservation**, July-August, pp.252-255.

Edwards W.M. and L.B.Owens (1991) Large storm effects on total soil erosion, **Journal of Soil and Water Conservation**, January-February, pp.75-78.

Esteva, G. (1980) **La batalla en el México rural**. ed. Siglo XXI, México 243 pp.

European Conference on Geographical Information Systems (1990), **EGIS'90: Proceedings**, Utrecht, The Netherlands, EGIS foundation.

Evans, D.L. (1992) Using GPS to evaluate aerial video missions, **GPS World**, July/August, pp.24-29.

Evans, D.L. and R.C.Beltz (1992) Aerial Video and associated technologies for forest assesments. In Greer, J.D., ed. **Remote Sensing and Natural Resource Management: Proceedings of the fourth forest service remote sensing applications conference**, 1992 April 6-11, Orlando, FL., pp.301-304, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, MD, USA.

Evans, D.L. and R.C.Beltz (in press) Aerial video for support of forest inventory, **Proceedings of The 13th Biennial Workshop on Color Aerial Photography in the Plant Sciences**, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, MD, USA.

Everitt, J.H. and P.R.Nixon (1985a) False Color Video Imagery: A Potential Remote Sensing Tool for Range Management, **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Vol.51 No.6 pp.675-679.

Everitt, J.H. and P.R.Nixon (1985b) Video Imagery: A New Remote Sensing Tool for Range Management, **Journal of Range Management** 38(5), pp.421-424.

Everitt, J.H., M.A.Hussey, D.E.Escobar, P.R.Nixon and B.Pinkerton (1986) Assessment of Grassland Phytomass with Airborne Video Imagery, **Remote Sensing of Environment** 20:299-306.

Everitt, J.H., D.E.Escobar, M.A.Alaniz and M.R.Davis (1987) Using Airborne Middle-Infrared (1.45-2.0 um) Video Imagery for Distinguishing Plant Species and Soil Conditions, **Remote Sensing of Environment**, 22:423-428.

Everitt, J.H., D.E.Escobar and P.R.Nixon (1987a) Near Real-Time Video Systems for Rangeland Management, **Remote Sensing of Environment**, 23:291-311.

Everitt, J.H., A.H.Gerbermann, D.E.Escobar, P.R.Nixon and M.A.Alaniz (1987b) Detecting Saline Soils with

Video Imagery, **Proceedings of The Eleventh Biennial Workshop on Color Aerial Photography and Videography in the Plant Sciences and Related Fields**, pp.318-325, April 27-May 1, Weslaco, Texas. Editado por ASPRS, Bethesda, MD, USA.

Everitt, J.H., D.E.Escobar (1989) The status of Video Systems for Remote Sensing Applications, **Proceedings of The Twelfth Biennial Workshop on Color Aerial Photography and Videography in the Plant Sciences and Related Fields**, pp.6-29, Sparks, Nevada, 23-26 May 1989. Editado en 1990 por ASPRS, Bethesda, MD, USA.

Everitt, J.H., A.J.Richardson, D.E.Escobar and R. Villareal (1989) Mapping Native Plant Communities with Color-Infrared Video Imagery, **Proceedings of The Twelfth Biennial Workshop on Color Aerial Photography and Videography in the Plant Sciences and Related Fields**, pp.30-40, Sparks, Nevada, 23-26 May 1989. Editado en 1990 por ASPRS, Bethesda, MD, USA.

Everitt, J.H., D.E.Escobar, M.A.Alaniz and M.R.Davis (1991) Light reflectance characteristics and video remote sensing of pricklypear, **Journal of Range Management** 44(6), pp.587-592.

Everitt, J.H., D.E.Escobar and J.R.Noriega (1991a) A High resolution Multispectral Video System, **Geocarto International** 6(4), pp.45-51.

Everitt, J.H., D.E.Escobar, R.Villareal, J.R.Noriega and M.R.Davis (1991b) Airborne Video Systems for Agricultural Assessment, **Remote Sensing of Environment** 35:231-242.

Everitt, J.H. and D.E.Escobar (1992) **Applications of Airborne Video for Agricultural and Rangeland Management**, Technical Papers of The ASPRS/ACSM/RT 1992 Convention, Mapping and Monitoring Global Change, Volume 5 (Resource Technology 92), Washington, D.C. August 3-8, pp.117-136.

FAO Food and Agriculture Organization (1965) **Soil Erosion by water. Some measures for its control on cultivated lands**, Rome: FAO Agricultural Paper 81.

FAO Food and Agriculture Organization (1988) Asian Region Workshop on Geographical Information Systems in Acquaculture, **Report of the FAO Asian Region Workshop** Rome, FAO.

Ferguson, Alex. (1989), **A technical and operational comparison of geographic information systems as applied to the Canadian Forest industry**, Victoria B.C., Forestry Canada.

Gaceta Ecológica (1989) **Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente**, Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, No.1, Vol.1, junio 1989, pp.2-32

Galicia-Sarmiento, L. (1992) **Influencia de la variabilidad de la forma de la pendiente en las propiedades físicas del suelo y su capacidad de retención de agua en una cuenca tropical estacional**, Tesis de Licenciatura en Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, 116 pp.

García, E. (1987) **Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen**, Inst. de Geog.de la UNAM, México, 246 pp.

García L., R.Domínguez, J.López-Blanco, C.Sánchez, (1992) **A Comparative Analysis of Acid Rain in two Cities of The Mexican Republic Using a Geographical Information System**, Technical Papers of The ASPRS/ACSM/RT 1992 Convention, Mapping and Monitoring Global Change, Volume 3 (GIS and Cartography) pp.37-44, Washington, D.C. August 3-8.

García, O.F., Ezcurra, E., and Galicia, L. (1991) Pattern of Rainfall Distribution in the Central Pacific Coast of Mexico, **Geografiska Annaler** 73 A (1991) 3-4, pp.179-186.

Garson, G. David. (1992), **Analytic Mapping and Geographic Databases**, Newbury Park, Sage Publications.

Geographic Information Systems Workshop (1986), **Proceedings of Geographic Information Systems**, Falls Church, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing.

Gerlach, T. (1967) Hillslope troughs for measuring sediment movement, **Rev.Géomorphol.Dynamique**, 17:173.

Gesch, D.B. y Naugle, B.I. (1984), **An Analysis of the Utility of Landsat TM and DEM Data for Predicting Soil Erosion**, Proc. Symp. Machine Processing of Remotely Sensed Data pp.260-265.

GIS International Symposium (1990), **GIS for the property & enviromental management; current applications & future directions**, Brisbane, Dept.of Lands.

GIS (1987) **Proceedings of GIS '87 San Francisco, Second Annual International Conference, Exhibits, and Workshops on Geographic Information Systems**, ACSM and ISPRS, varios volúmenes.

GIS/LIS (1988), **GIS/LIS '88 Proceedings: Accessing the world, Third Annual International Conference, Exhibits and Workshops**, Washington, Association of American Geographers.

GIS/LIS (1989), **GIS/LIS '89: Proceedings: Annual conference an exposition**, Wahington, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing.

GIS/LIS (1990), **GIS/LIS '90: Proceedings**, Washington, 1990.

Gleason, C. (1957), **Reconnaissance methods of measuring erosion**, Soil Conser. Soc. of America, pp. 105-107.

González, G. y González, J. (1977) **Detección de zonas erosionadas mediante imágenes de satélite**, Centro Científico IBM e Inventario Nacional Forestal, IBM-SARH.

González, T.M.A. (1986) **Descripción y aspectos fitogeográficos de la vegetación alpina del Nevado de Toluca, Edo. México**, Tesis, Fac. de Ciencias, UNAM. 50 pp.

Goodchild, Michael F. (1989), **The Accuracy of spatial databases**, London, New York, Taylor & Francis.

Goodchild, Michael F., et.al. (1993) **Enviromental modeling with GIS**, New York, Oxford University press.

Goodno, Barry J. (1992), **Computing in civil engineering and Geographic Information Systems Symposium**, New York, American Society of Civil Engineers.

Gorte B., W.Koolhoven, R.Liem and J.Wind (1990) Recent developments in the ILWIS software kernel, **ITC Journal 1990-3**, pp.215-218, Enschede, The Netherlands.

Goudie, A.(1990) **The Human Impact on the Natural Environment**, 3rd Ed., The MIT Press, Oxford, U.K., 388 pp.

Goudie, A., M.Anderson, T.Burt, J.Lewin, K.Richards, B.Whalley and P.Worsley (1990) **Geomorphological Techniques**, Second edition. Edited for The British Geomorphological Group, 570 pp., Unwin Hyman, London.

Grajales S.W., C.J. Vargas y G.G. Arévalo. (1986) **Cartografía y génesis de los suelos derivados de cenizas volcánicas del área de influencia del Nevado de Toluca**, Tesis, Chapingo, 130 pp.

Grenier, P. (1986) Problemas de la Ordenación del Territorio en América Latina, **Revista Geográfica IPGH**, No.104, pp.5-16, Instituto Panamericano de Geografía e Historia.

Guth, P.L.; Ressler, E.K.; Bacastow, T.S. (1987) Microcomputer program for manipulating large digital terrain models, **Computers & Geosciences** Vol.13,no.3, pp.209-213.

Gutiérrez-Valdéz, M.A. (1989) **Estudio geomorfológico y su relación con la conservación de recursos naturales en el municipio de Xicotepec de Juárez, Estado de Puebla (Estudio morfogenético y morfodinámico)**, Tesis de Licenciatura en Geografía, FFyL, UNAM, 84 pp.

Guy, P.L.O. (1932) Balloon Photography and Archaeological Excavation, **Antiquity** 6(148-55), citado en Myers, J.W. (1978) Balloon Survey Field Season, 1977, **Journal of Field Archaeology**, Vol.5 145-159.

Hails, J.R. (1978, Editor) **Applied Geomorphology: A perspective of the contribution of Geomorphology to Interdisciplinary Studies and Environmental Management**, Elsevier, Amsterdam, 418 pp.

Hall, G.F. (1983) Pedology and Geomorphology in Wilding, L.P. *et al.* editors, **Pedogenesis and Soil Taxonomy**, Elsevier, Amsterdam.

Harvey A. (1982) The role of piping in the development of badlands and gully systems in south-east Spain, Capítulo 18 pp.317-335, en Bryan, R. and Yair, A. **Badland Geomorphology and Piping**, Norwich: Geobooks.

Harvey A.M. (1992) Process interactions, temporal scales and the development of hillslope gully systems: Howgill Fells, Northwest England, **Geomorphology**, 5(1992) 323-344.

Heatly, Ralph O. (1991), **GIS Sources**, Oklahoma.

Hendrix, W.G. and D.J.A.Buckley (1992) Use of a geographic information system for selection of sites for land application of sewage waste, **Journal of Soil and Water Conservation**, 47(3):271-275.

Hodgson, M.E. (1989) Searching methods for rapid grid interpolation **Professional Geographer** 41(1), pp.51-61.

Horn, B.K.P. (1982) Hill shading and the reflectance map **Geo-Processing** , vol.2, pp 65-146.

Hosking, G.P., J.G.Firth, R.K.Brownlie and W.B.Shaw (1992) **Airborne Videography Evaluation in NZ 'Opening a Present from Uncle Sam'**, Technical Papers of The ASPRS/ACSM/RT 1992 Convention, Mapping and Monitoring Global Change, Volume 5 (Resource Technology 92), Washington, D.C. August 3-8, pp.137-144.

Howard, J.A. and C.W.Mitchell (1985) **Phytogeomorphology**, John Wiley & Sons, New York, 222 pp.

Hutchinson, M.F. (1989). A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits, **Journal of Hydrology**, No.106, pp:211-

Ichim I., G.Mihaiu, V.Surdeanu, M.Radoane, and N.Radoane (1990) Gully Erosion on Agricultural Lands in Romania, pp.55-67, in **Soil Erosion on Agricultural Land**, Edited by J.Boardman, I.D.L.Foster and J.A.Dearing, John Wilwy & Sons Ltd., Chichester, England.

ILWIS (1992) The Integrated Land and Water Information System. User's Manual, Version 1.3. **International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC)**. Second Edition, April, 1992 Volumes 1 and 2, Enschede, The Netherlands.

ILWIS (1993) The Integrated Land and Water Information System. User's Manual, Version 1.4. **International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC)**. First Edition, August, 1993, 1 Volume, Enschede, The Netherlands.

- Imeson, A. and F.P.M. Kwaad (1980) Gully Types and Gully Prediction, **Geographisch Tijdschrift**, XIV (5), 430-441.
- INEGI, Secretaria de Programación y Presupuesto (1982) **Geología de la República Mexicana**, México, 82 pp.
- Instituto de Geografía, UNAM (En prensa) **Atlas Nacional de México Hoja: Zonas Susceptibles a Desastres por Fenómenos Naturales, Mapas de Frecuencias de Ciclones Tropicales** (Fenómenos Hidrometeorológicos) Volumen: Naturaleza, México, D.F.
- International Conference GIS from Space to Territory Theories and Methods of Spatio-Temporal Reasoning** (1992), Pisa, Italy Springer-Verlag.
- ISPRS (1992) **Proceedings of the XVII ISPRS Congress**, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Washington, D.C. August 2-14, 1992, varios volúmenes.
- Jackson and Ritchie (1987) **Ephemeral Gully Detection Using Airborne Laser**, ASAE Paper No.87-2575.
- Jakubauskas, M.E., J.L. Whistler, M.E. Dillworth and E.A. Martinko (1992) Classifying remotely sensed data for use in an agricultural nonpoint-source pollution model, **Journal of Soil and Water Conservation**, 47(2):179-183.
- Johnson, A.I. et al. (1992) **Geographic Information Systems (GIS) and mapping: practices and standards**, Philadelphia, PA:ASTM.
- Kaminsky, S.A., Weismiller, R.A. y Blair, B.O. (1979), **An investigation of analysis techniques of Landsat MSS data designed to aid soil survey**, LARS Tech. Rep # 080879, Purdue University, West Lafayette, 68 pp. (citado en Bocco, G.H.R. y Valenzuela, C.R. (1988), Integration of GIS and image processing in soil erosion studies using ILWIS, ITC Journal, 1988-4. ITC-Enschede, The Netherlands, pp.309-319.
- Kirkby, M.J. and R.P.C. Morgan (Eds. 1980) **Soil Erosion**, John Wiley and Sons Ltd., Chichester, 312 pp.
- Lam, N.S. (1983) Spatial interpolation methods: a review **The American Cartographer** No.2, pp.129-149.
- Langran, Gail (1991), **Time in Geographic Information Systems**, London, Taylor & Francis, 189 pp.
- Legg, Christopher (1992), **Remote Sensing and Geographic Information Systems: Geological Mapping, Mineral Exploration and Mining**, New York, Ellis Horwood.
- Lillesand T.M. and R.W. Kiefer (1987) **Remote Sensing and Image Interpretation**, 2nd Ed., Wiley & Sons, 721 pp.
- Liu, D.S., L.R. Iverson and S. Brown (1993) Rates and patterns of deforestation in the Philippines: Application of geographic information system analysis, **Forest Ecology and Management**, Vol.57:1-16.
- López-Blanco, J., L. Galicia-Sarmiento y F. García-Oliva (1992) **Evaluación de las características morfológicas de laderas en una cuenca tropical estacional, en el contexto de un sistema de información geográfica**, Tomo II, pp 79-87, Memorias del XIII Congreso Nacional de Geografía, Aguascalientes, 27-29 de mayo de 1992.
- López-Blanco, J. y L. Villers-Ruiz (1994) Delineating Boundaries of Environmental Units for Land Management Using a Geomorphological Approach and GIS: A Study in Baja California, Mexico, **Proceedings of The Tenth Thematic Conference on Geologic Remote Sensing**, Volume II pp.13-24, San Antonio, Texas, 9-12 May 1994.
- López-Blanco, J. y J.L. Palacio-Prieto (1994) **Cuantificación del crecimiento de las áreas erosionadas en cabeceras de cárcavas procesando imágenes de video**, Memoria de Resúmenes de la Tercera Reunión Nacional

de Geomorfología, Guadalajara, Jal., Mayo 18-20, pp.91-95.

López-Blanco, J. y L. Villers-Ruiz (1994) **Delimitación de unidades ambientales físicas con fines de ordenamiento territorial aplicando un enfoque geomorfológico y SIG: Estudio de caso en Los Cabos, Baja California Sur**, Memoria de Resúmenes de la Tercera Reunión Nacional de Geomorfología, Guadalajara, Mayo 18-20, pp.96-99.

López R., E. (1981) **Geología de México**, Tomo III, 2a ed., México, 446 pp.

Lugo H., J. (1989) **Diccionario Geomorfológico**, Instituto de Geografía, UNAM, México, 337 pp.

Lugo H., J. (1990) El relieve de la República Mexicana, **Rev. del Inst. de Geología UNAM**, Vol.9, No.1, México.

Lugo H., J. y Córdova F. de A., C (1991) Mapa Morfogénesis, Sección Geomorfología I, **Atlas Nacional de México: Volumen Naturaleza**, Instituto de Geografía, UNAM.

Lugo H., J. y Córdova F. de A., C (1992) Regionalización Geomorfológica de la República Mexicana **Investigaciones Geográficas Boletín del Instituto de Geografía de la UNAM**, No.25, pp.25-63.

Luna-González, L., J.L. Palacio-Prieto y J. López-Blanco (1994) **Evaluación de la inestabilidad de terreros a partir de imágenes digitales de video y fotografías convencionales**, Memoria de Resúmenes de la Tercera Reunión Nacional de Geomorfología, Guadalajara, Jal., Mayo 18-20, pp.107-108.

Lyles, Dianne M. (1990) **Exxon Valdez oil spill: a geographic information management response**, Juneau, Alaska, Dept. of Natural Resources.

Maggio, R.C., D.M. Jacobs and R.D. Baker (1989) Digital Analysis of Forest Stands Using Scanned Photography and Still Video Images, **Proceedings of The Twelfth Biennial Workshop on Color Aerial Photography and Videography in the Plant Sciences and Related Fields**, pp.130-135, Sparks, Nevada, 23-26 May 1989. Editado en 1990 por ASPRS, Bethesda, MD, USA.

Maguire, D.J., Goodchild, M.F. and Rhind, D.W. (Eds. 1991) **Geographical Information Systems: Principles and Applications**, Volume 1: Principles (649 pp.) and Volume 2: Applications (447 pp.), Longman, U.K.

Martin, David (1991) **Geographic Information Systems: Principles and Applications**, Harlow, Essex, England, Longman Scientific & Technical.

MASCA, (1969) Balloon and Airfoil Photography, **MASCA Newsletter**, Vol.5, No.2, November, 3 pp., Applied Science Center for Archaeology, University of Pennsylvania.

Mass M., J.M. y F. García-Oliva (1990) La conservación de suelos en zonas tropicales: El caso de México, **Ciencia y Desarrollo**, Vol.XV, No.90, pp.21-36, México.

Masser, Ian (1991) **Handling Geographical Information: Methodology and Potential Applications**, England, Longman Scientific & Technical.

Mc Donnell, M.J. (1982) **Automatic relief shading**, N.Z. Phys. Eng. Lab. Rep. No.764, pp. 545-548.

McLemore, William H. (1988) **Using Geographical information systems for environmental decision making**, Atlanta, Dept. of Natural Resources, Environmental Protection Division.

Meijerink A.M.J. (1990) Summary report on ILWIS development, **ITC Journal 1990-3**, pp.205-214, Enschede, The Netherlands.

- Meisner, D.E. (1985) **Color Infrared Aerial Video: Applications in Natural Resources Management**, Proceedings of The 10th William T.Pecora Memorial Remote Sensing Symposium, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Ft.Collins Co., pp.80-87.
- Meisner, D.E. (1986) Fundamentals of Airborne Video Remote Sensing, **Remote sensing of Environment**, Vol.19 No.1 pp.63-80.
- Meisner, D.E. (1987) Fundamentals of Airborne Video Remote Sensing, **Proceedings of The Tenth Biennial Workshop on Color Aerial Photography in The Plant Sciences and Related Fields**, pp.55-71, May 21-24, 1985, Ann Arbor, Michigan, American Society of Photogrammetry and Remote Sensing.
- Meisner, D.E. and O.M.Lindstrom (1985) Design and Operation of a Color Infrared Aerial Video System, **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Vol.51 No.5 pp.555-560.
- Méndez, L.A.P. (1991) **Metodología para la evaluación físico ambiental-forestal aplicada a la cuenca del río Temascaltepec**, Edo. México, Tesis, Fac. de Ciencias, UNAM. 120 pp.
- Meyer, M.P., D.E.Meisner, N.L.Johnson and O.M.Linstrom (1983) **Small Aircraft 35 mm Photography and Video Imagery Applications to Developing Country Resource Surveys**, Proceedings of National Conference on Resource Management Applications: Energy and Environment, Vol.1, San Francisco, Ca.
- Miehlich, G. (1979) El efecto del desmonte y de la agricultura en los suelos de la Sierra Nevada de México, **Comunicaciones** 16, pp.69-80.
- Miller, B.M. (1993) **Guide to the development an application of Geographic Information Systems for sedimentary basin analysis: case study for the San Juan Basin, New Mexico an Colorado**, Wash., US GPO.
- Mills H.H. and Keating G.N. (1992) Post-Eruption Erosion and Deposition in the 1980 Crater of Mount St.Helens, Washington, determined from digital maps, **Earth Surface Processes and Landforms**, Vol.17, 739-754.
- Mims III, F.M. (1990) The Amateur Scientist. A Remote-Control Camera that catches the wind and captures the landscape, **Scientific American**, October, pp.92-95.
- Mitchell J.K. and G.D.Bubbenzer (1980) Soil Loss Estimation, in Kirkby, M.J. and R.P.C.Morgan (Eds. 1980) **Soil Erosion**, John Wiley and Sons Ltd., Chichester, pp.17-62.
- Montgomery, Glenn E. (1992) **GIS Data Conversion Primer**, Harold C. Schuch, prepared for IBM Corporation.
- Moore I.D., O'Loughlin E.M. and Burch G.J. (1988). A Contour-Based Topographic Model for Hydrological and Ecological Applications. **Earth Surface Processes and Landforms**, Vol.13, pp.305-320.
- Morgan R.P. (1979) **Soil Erosion**, Longman, New York.
- Morgan, K.M., D.R.Morris, G.B.Lee, R.W.Kiefer, G.D.Bubbenzer, T.C.Daniel (1980), Aerial Photography as an Aid to Cropland Erosion Analysis, **Transactions of the ASAE**, 23(4):907-913.
- Morgan, K.M. and R.Nalepa (1982) Application of aerial photographic and computer analysis to the USLE for areawide erosion studies, **Jour. Soil & Water Conser.**, November-December, pp.347-350.
- Morgan, John M. (1990) **Directory of Colleges and Universities Offering Geographic Information Systems Courses**, Washington, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing.

- Mosiño, P.A. (1964) Tiempo superficial y configuraciones del flujo aéreo superior en México. **Geofísica Internacional** No.4, pp.117-168, México.
- Mozer, M. and P.Seige (1971) **High Resolution Multispectral TV Camera System**, Proceedings of 7th International Symposium on Remote Sensing of Environment, pp.1475-1481, citado en Everitt, J.H. and D.E.Escobar (1992) Applications of Airborne Video for Agricultural and Rangeland Management, Technical Papers of The ASPRS/ACSM/RT 1992 Convention, Mapping and Monitoring Global Change, Volume 5 (Resource Technology 92), Washington, D.C. August 3-8, pp.117-136.
- Munier-Lee, P. (1993) Quick Focus, **Video Maker Reviw**, Vol.VII, No.13, July 1993, pp.10, U.S.A.
- Mussakowski, R. (1983) **The Application of Video of Remote Sensing to Resource Survey and Environmental Monitoring**, 8th Canadian Synposium on Remote Sensing and 4th Conference of L'Association Quebecoise de Teledetection, Mayo 3-6 Québec, pp.91-99.
- Myers, J.W. (1978) Balloon Survey Field Season, 1977, **Journal of Field Archaeology**, Vol.5 145-159.
- Myhre, R. (1992) **Use of Color Airborne Videography in the U.S.Forest Service**, Technical Papers of The ASPRS/ACSM/RT 1992 Convention, Mapping and Monitoring Global Change, Volume 5 (Resource Technology 92), Washington, D.C. August 3-8, pp.145-152.
- National Research Council U.S. (1990)., **Geographic Information Systems 1990**, Washington D.C. Transportation Research Board, National Research Council.
- Navarro, C.J. (1976) **Algunos estudios de suelos derivados de cenizas volcánicas o de Ando del Nevado de Toluca (regiones este y sur)**, Tesis, Fac. de Ciencias, UNAM. 43 pp.
- OOI, Beng, Chin (1991), **Efficient Query Processing in Geographic Information Systems**, Berlin, New York, Springer-Verlag.
- Ortiz-Pérez, M.A. (1985), Fotointerpretación geomorfológica del Delta del Río Balsas, Mich.-Gro., **Memorias del VIII Congreso Nacional de Fotogrametría Fotointerpretación y Geodesia**, Morelia, Mich., 23-26 abril, Tomo 1, pp.203-216.
- Palacio-Prieto, J.L. and L.Vázquez-Sélem (1990) Relative importance of modelling processes in badland slopes: An example in central Mexico, **Z.Geomorph.N.F.** 34, 3,, pp.301-306, Berlin-Stuttgart, September, 1990.
- Palacio-Prieto, J.L. (1990) Determinación de áreas de erosión potencial en cárcavas: Un ejemplo en el centro de México, **Investigaciones Geográficas Boletín del Instituto de Geografía de la UNAM**, No.21, pp.45-55, México.
- Palacio P., J.L., Bocco V., G. y Valenzuela, C.R. (1991) Erosión en cárcavas en el Sistema Volcánico Transmexicano. Un modelo utilizando percepción remota, sistemas de información geográfica y análisis geomorfológico, **Investigaciones Geográficas Boletín del Instituto de Geografía de la UNAM**, México.
- Palacio-Prieto, J.L, J., López-Blanco y M.A. Ortiz-Pérez, (1991) Evaluación geomorfológica estructural a través de modelos sombreados y pares estereoscópicos generados a partir de modelos digitales de terreno, **Investigaciones Geográficas Boletín del Instituto de Geografía de la UNAM**, No.23 pp.89-101.
- Palacio-Prieto, J.L. y J.López-Blanco (1992) **Obtención y procesamiento de imágenes multitemporales de video para la evaluación de la erosión en cárcavas**, Memorias del Primer Simposio Internacional sobre Sistemas de Información Geográfica (SIG) para el Estudio de Riesgos Naturales, Bogotá, Colombia, 8-15 de marzo de 1992, pp.35-47

Palacio-Prieto, J.L., J.López-Blanco y M.A.Ortíz-Pérez (1992) Zonificación de magnitudes de tormentas máximas probables (en 24 horas) para períodos de retorno de 2 a 1,000 años usando sistemas de información geográfica: El caso de la República Mexicana, **Investigaciones Geográficas Boletín del Instituto de Geografía de la UNAM**, No.25, pp.65-79.

Palacio-Prieto, J.L. and J.López-Blanco (1994) Using Video imagery for gully erosion evaluation, **Zeitschrift für Geomorphologie N.F.**, Vol.38, No.1, pp.33-43, März 1994, Berlin-Stuttgart.

Pelton, C. (1987) A computer program for hill shading digital topographic data sets **Computers & Geosciences**, vol.13, no.5, pp. 545-548.

Peralta, A., Peralta, R., Díaz, C., Vicente, E. y Prado, J. (1991) **Estudios agrícolas y forestales con imágenes multiespectrales de alta resolución**, II Reunión Nacional SELPER-México. Septiembre 12 y 13, Aguascalientes.

Peralta, R., Peralta, A., Prado, J., Vicente, E. y Navarrete, M. (1991) **Grupos de cámaras CCD multiespectrales para diversos estudios de PR con bajo costo**, V Simposio Latinoamericano de Percepción Remota, 28 de octubre al 1 de noviembre, Cusco, Perú, pp. 633-643.

Peralta, R., A.Peralta, J.Prado, M.Navarrete, C.Díaz y W.Martínez (1992) Dinámica Campo-Ciudad: Análisis por Videogrametría, **Congreso Internacional de Antropología e Historia. Simposio Cuenca del Golfo y Megalópolis**, CECODES, Veracruz, Sept.1992.

Peralta, R., A.Peralta, J.Prado y M.Navarrete (1993) La alternativa videogramétrica en casos de Percepción Remota tradicional, **Boletín SELPER-México** No.17, julio 1993, pp.10-31.

Peralta, R., Peralta, A., Prado, J., Navarrete, M. y Martínez, W. (inédito) **The development of a digital videogrammetric airborne system**, 7 pp.

Peuquet, Donna J. (1990), **Introductory readings in geographic information systems**, London, New York, Taylor & Francis.

Poesen, J. and G.Govers (1990) Gully Erosion in the Loam Belt of Belgium: Typology and Control Measures, pp.513-530, in **Soil Erosion on Agricultural Land**, Edited by J.Boardman, I.D.L.Foster and J.A.Dearing, John Wiley & Sons Ltd., Chichester, England.

PROTIMBOS (1972) **Síntesis del Proyecto Nevado de Toluca**, Dirección Técnica Forestal, Edo.de México, 34 pp.

Raper Johnathan, Editor (1989), **Three Dimensional Applications in Geographical Information Systems**, Taylor & Francis, London.

Reising, P. and S.Lydiard (1989) Integration of Videography with GIS Systems for Environmental Studies and Natural Resources, **Proceedings of The Twelfth Biennial Workshop on Color Aerial Photography and Videography in the Plant Sciences and Related Fields**, pp.136-148, Sparks, Nevada, 23-26 May 1989. Editado en 1990 por ASPRS, Bethesda, MD, USA.

RESTEC Remote Sensing Technology Center of Japan (s/fecha), **JERS-1: Japanese Earth Resources Satellite-1 and MOS-1: Marine Observation Satellite-1**, Folleto de Difusión, 18 pp., Japón.

Reynolds, John., et.al (1990) **Report of the Workshop on Geographic Information Systems as an Aid to Managing Habitat for West Indian Manatees in Florida and Georgia**, St. Petersburg, The Institute.

Richardson, A.J., R.M.Menges and P.R.Nixon (1985) Distinguishing Weed from Crop Plants Using Video Remote Sensing, **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Vol.51 No.11 pp.1785-1790.

- Richardson, A.J., M.D.Heilman and D.E.Escobar (1989) Estimating Grain Sorghum Yield from Video and Reflectance Based PVI Measurements at Peak Canopy Development, **Proceedings of The Twelfth Biennial Workshop on Color Aerial Photography and Videography in the Plant Sciences and Related Fields**, pp.99-108, Sparks, Nevada, 23-26 May 1989. Editado en 1990 por ASPRS, Bethesda, MD, USA.
- Ritchie, J.C., J.H.Everitt, D.E.Escobar, T.J.Jackson and M.R.Davis (1992) Airborne Laser Measurements of Rangeland Canopy Cover and Distribution, **J.of Range Management**, 45:189-193.
- Ritchie, J.C., T.J.Jackson, J.H.Everitt, D.E.Escobar, J.B.Murphey, and E.H.Grissinger (1992) Airborne Laser: A tool to study landscape surface features, **Journal of Soil and Water Conservation**, 47(1):104-107.
- Robinove, C. and H.Skibitske (1967) **An Airborne Multispectral Television System**, U.S.Geol.Survey Prof.Paper 575-D, pp.D143-D146, citado en Everitt, J.H. and D.E.Escobar (1992) Applications of Airborne Video for Agricultural and Rangeland Management, Technical Papers of The ASPRS/ACSM/RT 1992 Convention, Mapping and Monitoring Global Change, Volume 5 (Resource Technology 92), Washington, D.C. August 3-8, pp.117-136.
- Romero-Terán,M.C. (1989) **Estudio geomorfológico de la erosión acelerada en el Municipio de Huasca de Ocampo, Edo.de Hidalgo Erosión en cárcavas**, Tesis de Lic.en Geog., F.F.y L. de la UNAM, México, 80 pp.
- Romo, J.M. (1989) Gray scale maps with a personal computer **Computers&Geosciences** Vol.15, no.8, pp.1249-1263.
- Rood B.(1993) Resolution Lines, **Video Maker Reviv**, Vol.VII, No.11, May, pp.81-82, USA.
- Ruhe, R.V.(1975) **Geomorphology: Geomorphic Processes and Surficial Geology**, Hought-Mifflin, Boston, 246pp.
- Sandoval, B.A.J. (1987) **Actualización y análisis cartográfico sobre uso del suelo y vegetación del Parque Nacional Nevado de Toluca, Edo. de México**, Tesis Fac. de Ciencias UNAM, 107 pp.
- SARH, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (1971) **Boletín Hidrológico No.49 de la Región Hidrológica No.18 (Cuenca del Medio y Bajo Balsas)**, Volumen III, México.
- Saunders, I. and Young, A. (1983) Rates of surface processes on slopes, slopes retreat, and denudation, **Earth Surface Processes and Landforms**, 8, pp.473-501.
- Savage, Stephen Howard (1989), **Late Archaic Landscapes: a Geographic Information Systems Approach to the Late Archaic Landscape of the Savannah River Valley, Georgia and South Carolina**, Columbia, University of South Carolina.
- Savazzi, E. (1990) C programs for displaying shaded three-dimensional objects on a PC, **Computers & Geosciences**, vol 16, no.2, pp 195-209.
- Schmidt M.O. and W.H.Rayner (1978) **Fundamentals of Surveying**, Second Ed., Van Nostrand, New York, 450 pp.
- Schouten, C.J. and M.C.Rang (1984) Measurement of gully erosion and the effects of soil conservation techniques in Puketurua Experimental Basin (New Zealand), **Z.Geomorph.N.F. Suppl.-Bd.49**, pp.151-164, Berlin-Stuttgart, Oktober, 1984.
- Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE, 1988) **Manual de Ordenamiento Ecológico del Territorio**, Subsecretaría de Ecología, Dirección General de Normatividad y Regulación Ecológica, México, 356 pp.

Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología SEDUE (1989) **Información básica sobre las áreas naturales protegidas de México**, 82pp.

Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología y Organización de los Estados Americanos (SEDUE-OEA, 1992) **Proyecto de Ordenamiento Ecológico de Regiones Geográficas con Actividades Productivas Prioritarias, Municipio de Los Cabos, B.C.S.** (Diagnóstico Integrado), Subsecretaría de Ecología, Dirección General de Normatividad y Regulación Ecológica y Departamento de Desarrollo Regional y Medio Ambiente de la OEA, México, 191 pp.

Selby, M.J.(1982), **Hillslope Materials & Processes**, Oxford University Press, Oxford, 264 pp.

SG-GEM (1988) Secretaría de Gobernación y Gobierno del Edo.de México, **Los municipios del Estado de México**.

Sharpnack, D.A. and Akin, G. (1969) An algorithm for computing slope and aspect from elevations **Photogram. Eng. & Remote Sensing**. # 35, pp: 247-

Shaw G. and D.Wheeler (1985) **Statistical Techniques in Geographical Analysis**, Wiley & Sons, Chichester, 364 pp.

Singh A. (1986) Change Detection in the Tropical Forest Environment of Northeastern India using Landsat, **Remote Sensing and Tropical Land Management**, pp.237-254, Edited by M.J.Eden and J.T.Parry, John Willy & Sons Ltd., New York.

Smith *et al.* (1986) **KBGIS-II: A Knowledge-Based Geographic Information System**. Department of Computer Science, University of California, Santa Barbara, 36 pp.

Sony Corporation (1989) **Video Camera Recorder CCD TR55 User's Manual**, Japan, 157 pp.

Spomer, R. and Mahurin, R.L.(1984) Time-lapse remote sensing for rapid measurement of changing landforms **Jour. Soil & Water Conser.** Nov.-Dec. pp.397-401

SRH, Secretaría de Recursos Hidráulicos (1976) **Boletín de Tormentas Máximas Observadas y Probables en México (Hasta 1974)**, Secretaría de Recursos Hidráulicos, México, D.F.

Stafford, Donald B. (1991), **Civil Engineering Applications of Remote Sensing and Geographic Information Systems**, New York, American Society of Civil Engineers.

Stephens, P.R., Daigle, J.L. and Cihlar, J. (1982) Use of sequential aerial photographs to detect and monitor soil management changes affecting cropland erosion, **Jour. Soil & Water Conser.** 40(3) pp.293-296.

Stutte, C.A. and G.W.Stutte (1989) Quantification of Field Crop StressAreas Using Videography, **Proceedings of The Twelfth Biennial Workshop on Color Aerial Photography and Videography in the Plant Sciences and Related Fields**, pp.88-93, Sparks, Nevada, 23-26 May 1989. Editado en 1990 por ASPRS, Bethesda, MD, USA.

Stutte, G.W., R.Bors and C.A.Stutte (1989) **Proceedings of The Twelfth Biennial Workshop on Color Aerial Photography and Videography in the Plant Sciences and Related Fields**, pp.109-117, Sparks, Nevada, 23-26 May 1989. Editado en 1990 por ASPRS, Bethesda, MD, USA.

Symposium SSD (1991) **Advances in Spatial Databases**, Berlin, Springer-Verlag.

Talavera, A. y Barrera, V. (1991) **Sistema de adquisición y procesamiento de imágenes basado en cámaras**

CCD e integradores de video en computadoras, V Simposio Latinoamericano de Percepción Remota, 28 de octubre al 1 de noviembre, Cusco, Perú, pp. 659-665.

Taylor, D.R.F.(1991) **Geographic information systems: the microcomputer and modern cartography**, Oxford, England, New York, Pergamon Press,

Thomas, A.W. and Welch, R.(1987) **Measuring ephemeral gully erosion with aerial photogrammetry** ASAE paper # 97-2576.

Thomas, A.W., Welch, R. and Jordan, T.R. (1986) Quantifying concentrated flow erosion on cropland with aerial photogrammetry **Jour. Soil & Water Conser.**, July-Aug. pp. 249-255.

Thompson, L.L. (1979) Remote Sensing Using Solid-State Array Technology, **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Vol.45 No.1 pp.47-55.

Thorne, C.R. and L.W.Zevenbergen (1990) Prediction of Ephemeral Gully Erosion on Cropland in the South-eastern United States, pp.447-460, in **Soil Erosion on Agricultural Land**, Edited by J.Boardman, I.D.L.Foster and J.A.Dearing, John Wilwy & Sons Ltd., Chichester, England.

Tomlin, C. Danna (1990) **Geographic Information Systems and Cartographic Modeling**, Englewood Cliffs, N.J., Prentice Hall, 1990.

Treadwell, B.D., S.Berwick and P.L.Warren (1985) **Emerging Technologies for the Assessment and Monitoring of Wildlife Habitat in Developing Countries**, Proceedings of The 10th William T.Pecora Memorial Remote Sensing Symposium, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Ft.Collins Co., pp.362-379.

Tricart,J. (1965) **Principes et méthodes de la Geomorphologie**, Paris, Masson.

Tricart J. y J.Kilian (1982) **La Eco-Geografía y la Ordenación del Medio Natural**, editorial Anagrama, Serie: Elementos Críticos Número 22, Barcelona, 288 pp.

Trueba, A., Benitez, A., Sanchez, R. y Vital, R. (1984) **Percepción remota; Principios y Aplicaciones**, Dirección General de Conservación de Suelo y Agua, SARH.

Ugalde-Rivera, J.J. (tesis en proceso) **Inventario de áreas erosionadas en la porción noroeste de la Sierra de Quetzaltepec, Texcoco, Estado de México**, Tesis Licenciatura en Geografía, FFyL, UNAM.

Valenzuela, C.R. (1988), ILWIS Overview, **ITC Journal 1988-1**, ITC-Enschede, The Netherlands, pp.3-14.

Valenzuela, C.R. and M.J.C., Weir (1989), **Introduction to Geographic Information Systems**, ITC-Enschede, The Netherlands, Circulación interna 54 pp.

Valenzuela, C.R. and M.F.Baumgardner (1990) Selection of appropriate cell sizes for thematic maps, **ITC Journal 1990-3**, pp.219-224, Enschede, The Netherlands.

Van der Hammen Th. (1983). **Studies on tropical Andean Ecosystems**. Vol.I. La Cordillera Central Colombiana, transecto parque Los Venados, Cramer, Vaduz, 345 pp.

Van Zuidam, .R.A. and F.v.Zuidam C. (1979) **Terrain Analysis and Classification Using Aerial Photographs**, ITC Text Book VII-6, Enschede, The Netherlands.

Van Zuidam, .R. A. (1985/1986) **Aerial Photo-Interpretation in Terrain Analysis and Geomorphologic Mapping**, Smits Publishers, The Hague, The Netherlands, 442 pp.

- Vázquez-Sélem, L. (1992) **Gully erosion, soil and landforms in a volcanic area of central Mexico**, M.Sc.Thesis, ITC, Enschede, The Netherlands, 133 pp..
- Verstappen, H.Th. (1977), **The use of Aerial Photographs in Geomorphological Mapping**, ITC Text Book VII-5, Enschede, The Netherlands.
- Verstappen, H.Th. (1983), **Applied Geomorphology (Geomorphological Surveys for Environmental Development)**, Elsevier, Amsterdam, 437 pp.
- Verstappen, H.Th. (1992a), El concepto de Geomorfología Aplicada. Ejemplos de Colombia, Indonesia y Thailandia, pp.9-30, en **Estudios de Geomorfología en España**, López-Bermudez, Conesa-García y Romero Díaz (Editores), España.
- Verstappen, H.Th. (1992b), **Geomorphological Remote Sensing and the Study of Environment**, Associazione Italiana Telerilevamento, Estratto dagli Atti del V Convegno Nazionale, Italia.
- Verstappen, H.Th. and R.A.Van Zuidam (1991), **The ITC System of Geomorphologic Survey: A basis for the evaluation of natural resources and hazards**, ITC Publication Number 10, Enschede, The Netherlands, 89 pp.
- Villalpando, B.O. (1968) **Algunos aspectos ecológicos del Volcán Nevado de Toluca**, Tesis Fac. de Ciencias, UNAM. 36 pp.
- Villers-Ruiz, L. (1991) **Uso del suelo e impacto sobre el medio natural en el Eje Neovolcánico**, Programa de Investigación (Reporte interno), Instituto de Geografía, UNAM, 12 pp.
- Villers-Ruiz, L. y J.López-Blanco (1992), **Aplicación de un sistema de información geográfica para la evaluación del uso agrícola y forestal del suelo: Cuenca Alta del Río Temascaltepec, Nevado de Toluca**, Tomo II (pp.172-181), Memorias del XIII Congreso Nacional de Geografía, Aguascalientes, Ags., 27-29 de mayo de 1992.
- Villers-Ruiz, L., J.López-Blanco, I.Trejo-Vázquez, P.Tenorio-Ramírez (1993) **Caracterización de las unidades de paisaje terrestre y su vegetación en el municipio de Los Cabos, B.C.S., México**, p. , Memorias del XII Congreso Mexicano de Botánica, Mérida, Yucatán, de diciembre de 1993.
- Vlcek, J.(1983) Videography: Some Remote Sensing Applications, **Proceedings of 49th Annual Meeting of the American Society for Photogrammetry and Remote Sensing**, pp.63-69.
- Vlcek, J. and E.Cheung (1983) **Video Image Analysis**, 8th Canadian Symposium on Remote Sensing and 4th Conference of L'Association Quebecoise de Teledetection, Mayo 3-6 Québec, pp.63-69.
- Vlcek, J. and D.King (1985) Development and Use of a 4-Camera Video System, **Proceedings of the 19th International Symposium Remote Sensing of Environment**, pp.483-489.
- Vlcek, J., D.Jayasinghe, D.King, X.Yuan and F.Cadeau (1987) **Spectral and Spatial Classification of Land-Cover Types in Multispectral Aerial Video Imagery**, Proceedings of 11th Canadian Symposium on Remote Sensing, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, June 22-25, pp.99-107.
- Walker, Terri C. (1990) **Geographic information systems: an assessment of technology, applications and products**, Madison GA, SEAI Technical Publications.
- Walsh S.J. (1985) Geographic Information Systems for Natural Resource Management, **Journal of Soil and Water Conservation**, 40(2):202-205.

- Ware, C. (1989), Fast hill shading with cast shadows, **Computers & Geosciences** , Vol.15, no.8, pp 1327-1334.
- Weibel, R. and M.Heller (1991) Digital Terrain Modelling, Volume 1, pp.269-297, in Maguire, D.J., Goodchild, M.F. and Rhind, D.W. (Eds. 1991) **Geographical Information Systems: Principles and Applications**, Volume 1: Principles (649 pp.) and Volume 2: Applications (447 pp.), Longman, U.K.
- Weismiller, R.A., Persinger, I.D. y Montgomery, O.L.(1977), Soil inventory from digital analysis of satellite scanner and topographic data, **Journal of Soil Sci. Soc. of Am.** No.41, pp.1166-1170.
- Welch, R., Jordan, T.R. and Thomas, A.W. (1984) A Photogrammetric Technique for Measuring Soil Erosion, **Jour. Soil & Water Conser.** May-June. pp. 191-194.
- Welch, R., Jordan, T.R. and Thomas, A.W. (1985) Photogrammetric Input to a Geographic Information System for Modeling Soil Erosion, **Proceedings of The 10th William T.Pecora Memorial Remote Sensing Symposium**, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Ft.Collins Co., pp.272-275.
- Welch, R. and Thomas, A.W. (1985) Aerial Photogrammetry: A Potential Technology for Monitoring Soil Erosion, **Photo-Methods/Imaging Technology in Research and Development**, May 1985, pp.4-7.
- Whiting, M.L., DeGloria, S.D., A.S.Benson and S.L.Wall (1987) Estimating conservation tillage residue using aerial photography, **Jour. Soil & Water Conser.** March-April, pp.130-132.
- Wilson, Michael A. (1990) **Geographic information systems: a partially annotated bibliography**, Chicago Ill, Council of Planning Librarians.
- Whittlesey, J. (1967) Balloon Over Sardis, **Archaeology**, Vol.20, pp.67-68.
- Whittlesey, J. (1971) Aerial Photo Balloon, **Archaeology**, Vol.24, No.2, pp.174.
- Wolf, P.R. (1974) **Elements of Photogrammetry**, 2nd.ed., McGraw-Hill, New York.
- Wong, K.W. and M.Taleb-Obaidat (1992) **DRSTEREO A stereo measurement system for the PC**, Technical Papers of The ASPRS/ACSM/RT 1992 Convention, Mapping and Monitoring Global Change, Volume 2 (Photogrammetry and Surveying), Washington, D.C. August 3-8, pp.228-234.
- Worldmap (1993) **Worldmap: A revolution in Remote Sensing and Cartography**, First Circular of the Worldmap International Consortium for marketing and distribution of Russian Digital Satellite Data, June, 1993, Houston-London-Moscú.
- Worrall, Les (1990) **Geographic information systems: developments and applications**, London, New York, Belhaven Press.
- Worrall, Les (1991) **Spatial analysis and spatial policy using geographic information systems**, London, Belhaven.
- Wu, Shih-Tseng (1989) Utility of a digital video and image analysis system for forest and coastal wetland mapping, **Proceedings of The Twelfth Biennial Workshop on Color Aerial Photography and Videography in the Plant Sciences and Related Fields**, pp.164-170, Sparks, Nevada, 23-26 May 1989. Editado en 1990 por ASPRS, Bethesda, MD, USA.
- Young, A.(1972) **Slopes**, Geomorphology Text 3, Longman, London, 288 pp.

Zobrist, A. L. (1991) **RAAND's Cartographic Analysis and Geographic Information Systems (RAND-CAGIS): a guide to system use**, Santa Monica, CA., RAND.

Cartografía consultada Estudio de caso 2.

CETENAP-INSTITUTO DE GEOGRAFIA, UNAM (1970) **Carta de Tipos de Climas**, Carta México, editada a escala 1:500,000 (Clave 14Q-V), México.

INEGI (1986) **Carta Topográfica** Ciudad de México editada a escala 1:250,000 (Clave E142), México.

INEGI (1986) **Carta Geológica** Ciudad de México editada a escala 1:250,000 (Clave E142), México.

INEGI (1986) **Carta Edafológica** Ciudad de México editada a escala 1:250,000 (Clave E142), México.

INEGI (1986) **Carta de Uso del Suelo y Vegetación** Ciudad de México editada a escala 1:250,000 (Clave E142), México.

INEGI (1985) **Carta de Efectos Climáticos** (Mayo a Octubre) Ciudad de México editada a escala 1:250,000 (Clave E142), México.

INEGI (1985) **Carta de Efectos Climáticos** (Noviembre a Abril) Ciudad de México editada a escala 1:250,000 (Clave E142), México.

INEGI (1983) **Carta Hidrológica de Aguas Superficiales** Ciudad de México editada a escala 1:250,000 (Clave E142), México.

INEGI (1985) **Carta Hidrológica de Aguas Subterráneas** Ciudad de México editada a escala 1:250,000 (Clave E142), México.

INEGI (1974) **Cartas Topográficas** escala 1:50,000 claves: E14A46 (Valle de Bravo), E14A47 (Nevado de Toluca) y E14A57 (Ixtapan de la Sal), México.

INEGI (1976) **Cartas de Uso del Suelo y Vegetación** escala 1:50,000 claves: E14A46 (Valle de Bravo), E14A47 (Nevado de Toluca) y E14A57 (Ixtapan de la Sal), México.

INEGI (1976) **Cartas Edafológicas** escala 1:50,000 claves: E14A46, E14A47, E14A57, México.

INEGI (1975) **Cartas Geológicas** escala 1:50,000 claves: E14A46, E14A47, E14A57, México.

Cartografía consultada estudio de caso 3.

INEGI (1981) **Carta Topográfica** San José del Cabo editada a escala 1:250,000 (Clave F12-2-3-5-6), México.

INEGI (1984) **Carta Geológica** San José del Cabo editada a escala 1:250,000 (Clave F12-2-3-5-6), México.

INEGI (1985) **Carta Edafológica** San José del Cabo editada a escala 1:250,000 (Clave F12-2-3-5-6), México.

INEGI (1989) **Carta de Uso del Suelo y Vegetación** San José del Cabo editada a escala 1:250,000 (Clave F12-2-3-5-6), México.

INEGI (1984) **Carta de Efectos Climáticos** (Mayo a Octubre) San José del Cabo editada a escala 1:250,000 (Clave F12-2-3-5-6), México.

INEGI (1984) **Carta de Efectos Climáticos** (Noviembre a Abril) San José del Cabo editada a escala 1:250,000 (Clave F12-2-3-5-6), México.

INEGI (1988) **Carta Hidrológica de Aguas Superficiales** San José del Cabo editada a escala 1:250,000 (Clave F12-2-3-5-6), México.

INEGI (1988) **Carta Hidrológica de Aguas Subterráneas** San José del Cabo editada a escala 1:250,000 (Clave F12-2-3-5-6), México.

INEGI (1982-1984) **Cartas Topográficas** escala 1:50,000 claves: F12B23 (El Rosario), F12B33 (Todos Santos), F12B43 (La Candelaria), F12B53 (San Cristobal), F12B24 (Las Cuevas), F12B34 (Santiago) F12B44 (San José del Cabo), F12B54 (Cabo San Lucas), F12B25 (La Rivera), F12B35 (Cabo Pulmo), F12B45 (Palo Escopeta), México.

CETENAP-INSTITUTO DE GEOGRAFIA, UNAM (1970) **Carta de Climas** editada a escala 1:500,000 (Clave San José del Cabo 12QII), México.

Apéndice A

Apéndice A.1

Revisión bibliográfica de documentos publicados relacionados con aplicaciones videográficas.

En este apéndice se presenta, una reseña de la revisión bibliográfica que se hizo, en relación al tema de las aplicaciones y utilización de las imágenes de video. Los temas encontrados más frecuentes fueron: evaluación e inventario de recursos naturales, caracterización de condiciones de cultivos agrícolas, clasificación de tipos de vegetación natural y sus condiciones ambientales. El acomodo ha sido por el orden cronológico dado éste por la fecha de publicación de los textos. Por la cantidad de información consultada y por la importancia que representan estos antecedentes se ha optado por incluirlos en este apartado. Aunque es importante decir que, en la búsqueda de información realizada, no se detectó ningún reporte de aplicaciones de imágenes de video para realizar mediciones en el terreno, tema de este estudio de caso.

En Mussakowski (1983), como uno de los primeros antecedentes de aplicaciones de imágenes de video en evaluación de recursos naturales, se presentan conceptos y elementos físicos (equipo) básicos para la aplicación de la videografía. Se mencionan las experiencias del autor en el Centro de Percepción Remota de Ontario, desde principios de 1980, en las áreas de: Evaluación del éxito de la regeneración de bosques de coníferas, el mapeo del uso agrícola del suelo, el monitoreo a detalle de las características de los cauces, las pruebas realizadas para el uso de esta tecnología en estudios de la calidad del agua, etc. Al final concluye mencionando algunas de las ventajas que se tienen con el uso de este tipo de imágenes.

En Vlcek y Cheung (1983), también se encuentra uno de los antecedentes primarios de aplicaciones en los campos mencionados. En este texto los autores hacen una revisión de la potencialidad del análisis del territorio con videografía aérea y algunos aspectos relacionados con el análisis digital de imágenes. Describen algunas características generales de las imágenes de video, consideran algunas ventajas y desventajas de ellas y presentan algunas aplicaciones que más que ejemplificar casos concretos, lo que muestran son algunas posibilidades de aprovechamiento y procesamiento de la información contenida en dichas imágenes. Algunas de esas posibilidades son: la actualización de los mapas de inventarios forestales, para la delimitación de las unidades de aprovechamiento forestal, mapeo de la humedad superficial del suelo para propósitos de irrigación y drenaje, etc. Además consideran algunos aspectos relacionados con las funciones necesarias que debe contener un sistema de procesamiento digital de imágenes de video.

Everitt y Nixon (1985a), evaluaron compuestos en falso color de imágenes de video de áreas de pastizales al compararlos con fotos aéreas en infrarrojo color. Emplearon tres cámaras en blanco y negro, cada una de ellas equipada con filtros de interferencia de "*banda angosta*", dos de ellas en el visible y una en el infrarrojo cercano. Además hicieron tomas fotográficas con una cámara Hasselblad de formato de 70 mm con película en el visible-infrarrojo (0.5-0.9 μm). Los autores concluyen que un sistema de video de falso color tiene un potencial considerable como una herramienta en percepción remota que ayuda en la evaluación de algunos de los recursos dentro de los ambientes semidesérticos en Texas (pastizales o "*rangeland*"). También mencionan la utilidad de esas imágenes en aplicaciones que requieren evaluaciones rápidas para estimar efectos de fuegos e inundaciones en el paisaje mencionado.

Everitt y Nixon (1985b), utilizaron cuatro cámaras de video de sistema de tubo, en blanco y negro, una de ellas modificada para recibir información en longitudes de onda desde el azul visible hasta el infrarrojo cercano (0.3-1.1 μm). En todas ellas se usaron filtros espectrales de "*banda angosta*". Su objetivo fue el de mostrar que ese sistema de video puede ser útil para evaluar

algunas características seleccionadas de los recursos existentes en ambientes de pastizales semidesérticos (Sur de Texas). Sus resultados mostraron que las medidas de reflectancia de luz de los doseles de las plantas, entre los 0.4 a 0.9 μm , mostraron que la *Estemodia tomentosa* tuvo significativamente más alta reflectancia en el visible que otras especies o mezclas de especies, en cambio su reflectancia en el infrarrojo no difiere estadísticamente de la del mesquite dulce (*Prosopis glandulosa*) y de especies herbáceas mezcladas.

Meisner y Lindstrom (1985), utilizaron una cámara de color de tres tubos, los cuales reciben imágenes espectrales en el verde, rojo e infrarrojo, respectivamente, a partir del uso de espejos dicróicos que separan la energía luminosa de entrada, en las tres bandas mencionadas. Ellos hacen una descripción detallada de las características de los equipos que se usan en videografía (especificaciones técnicas, costos, opciones, etc.). Finalmente hacen una recopilación de las ventajas y desventajas que consideran más relevantes en el uso de esa tecnología, respecto a esto concluyen que los sistemas de percepción remota con video imágenes no se pueden utilizar en todos los casos como herramienta óptima.

Richardson *et al.* (1985), utilizaron para la toma de las imágenes cuatro cámaras de video de tubo, cada una de ellas con un filtro espectral de "banda angosta" instalado para captar desde el azul, amarillo-verde, rojo e infrarrojo cercano, respectivamente. Este trabajo se hizo con el objetivo de diferenciar entre maleza y cultivos agrícolas, en crecimiento en parcelas experimentales, a partir de clasificaciones espectrales supervisadas, utilizando el algoritmo de clasificación de máxima verosimilitud. Las imágenes fueron tomadas en avioneta desde una altura de 900 m. Ellos utilizaron seis diferentes tipos de cobertura con cuatro repeticiones cada una, para dos fechas diferentes en el análisis (mayo y julio, 1983). Los resultados que muestran de las clasificaciones realizadas, en relación a las exactitudes alcanzadas, son de un 75 % y 73 % para cada una de las fechas individualmente y de 88% para las dos fechas combinadas. Concluyen que la percepción remota con video puede, en tiempo casi real, proporcionar exactitudes adecuadas en la diferenciación y cuantificación entre cultivos diferentes, maleza y suelo descubierto, presentes todos en una misma imagen.

Everitt *et al.* (1986), utilizaron imágenes tomadas con dos cámaras en blanco y negro, una sensible al visible y la otra al infrarrojo, con el fin de cuantificar fitomasa dentro de parcelas de pastos cultivados y fertilizados con cinco diferentes cantidades de nitrógeno. Ellos registraron imágenes de dos fechas (abril y mayo de 1985) tomadas en una avioneta desde una altura de 900 m. Además hicieron medidas radiométricas en el terreno al mismo tiempo en que las imágenes fueron obtenidas. Cuantificaron también el valor de la fitomasa mediante la colecta de las plantas dentro de cuatro cuadrantes de 50 x 50 cm, localizados en el interior de las parcelas de estudio. Ellos concluyeron que con el método empleado es posible evaluar la fitomasa en pastos. Con respecto a esto, tres niveles de fitomasa fueron diferenciados utilizando las imágenes en el rojo e infrarrojo y cuando utilizaron un compuesto con el cociente de las dos bandas mencionadas lograron, diferenciar cuatro niveles.

Everitt *et al.* (1987), utilizaron tres cámaras de video en blanco y negro (BN) de tubos de 1", dos en el visible y una en el infrarrojo cercano (0.4-0.7 y 0.4-1.5 μm , respectivamente). A las cuales se les agregaron, sobre los lentes de las cámaras, filtros de *banda angosta* dando al sistema la capacidad de registrar información, en bandas del espectro seleccionadas, desde visible e infrarrojo cercano (0.516-0.524, 0.644-0.656 y 0.815-0.827 μm , respectivamente). Una videogradora extra registraba simultáneamente un compuesto mezclado en falso color a partir de las tres cámaras, además de registrar en BN cada una de las bandas individuales. El objetivo de este trabajo fue el de evaluar imágenes de video para la detección de suelos salinos en terrenos agrícolas y áreas de pastizales, en el Sur de Texas. Se atribuyó en este trabajo que la habilidad de distinguir entre suelos salinos y no salinos en imágenes de video se debe principalmente a la menor cobertura de plantas sobre los suelos salinos y en segundo lugar a las diferentes condiciones de ambos tipos de suelos. Ellos concluyeron que del análisis realizado, las imágenes en compuestos

en infrarrojo color y de la *banda angosta* en el rojo visible, dieron mejores resultados que las imágenes de *banda angosta* en el verde visible y en el infrarrojo cercano.

Tal vez el trabajo más completo y amplio, de los consultados, en el sentido de las posibilidades de procesamiento digital de las imágenes multispectrales de video es el de Vlcek *et al.* (1987). Ellos utilizaron un sistema de cuatro cámaras blanco y negro con sensor de CCD, alineadas ópticamente y sincronizadas. Mediante el uso de un "*multimezclador*" registraban en la misma cinta, alternativamente o "*desviando*" ("*switcheando*"), la información recibida por las cuatro cámaras. Utilizaron filtros de interferencia de "*banda angosta*" dos en el visible (verde y rojo) y dos en el infrarrojo cercano (0.78-0.82 y 0.88-0.92 μm). Realizaron clasificaciones supervisadas y no supervisadas a partir del clasificador de máxima verosimilitud, además utilizando procedimientos estadísticos, compararon las clasificaciones procesadas con los datos espectrales originales, con respecto a los obtenidos del análisis de componentes principales (los tres primeros componentes), de la medida de la textura individual y en conjunto de los rasgos de las imágenes. Los resultados de las clasificaciones fueron evaluados por precisión relativa, al comparar las clases obtenidas con respecto a las de un mapa de cobertura "*verdadero*", utilizando un análisis de contingencias. Los análisis de las clasificaciones realizadas, mostraron que la clasificación no supervisada de los datos originales, no procesados, produjo los peores resultados. En cambio cuando se utilizaron los datos originales con una clasificación supervisada, se obtuvo la mejor exactitud relativa y ocho clases resultantes. De los métodos empleados que utilizaron datos procesados, el que individualmente tuvo mayor precisión fue el de componentes principales, con un compuesto de las texturas en las imágenes (69.6%). Un aspecto importante en el análisis de las clasificaciones reveló que, dentro del análisis espectral el pre-procesamiento que se realiza para eliminar el "*ruido aleatorio*", da mejores exactitudes que si después de las clasificaciones realizamos un "*suavizado*" de los límites de las clases resultantes. Ellos concluyen que, la clasificación automatizada y semiautomatizada de la cobertura del suelo, usando imágenes multispectrales de video, tiene un amplio potencial de aplicaciones en el aprovechamiento de recursos forestales.

Wu (1989) describe un procedimiento para evaluar sistemas videogramétricos y además presenta un análisis preliminar de imágenes de video digitizadas, obtenidas con cámaras convencionales (visible) y especiales (infrarrojo-color). El concluye que la distribución espacial, volumen y dinámica de la vegetación de bosques y humedales, pueden ser monitoreados por sistemas de video y el procesamiento digital de las imágenes.

Everitt y Escobar (1989), hicieron una revisión amplia sobre los diversos sistemas videográficos para aplicaciones en percepción remota, particularmente en la evaluación de recursos naturales. De entre los diversos sistemas que se han usado ellos consideran los ocho siguientes:

1. Una sola cámara, de tipo tubo, con sensibilidad al visible (V) e infrarrojo cercano (IRC) en blanco y negro (B/N), fue usada en los inicios de la videografía multispectral. Se ha aplicado en la detección del pulgón en plantas de papa y en detección de daños por heladas en cítricos.
2. Una sola cámara, de tipo CCD, con un dispositivo de seis filtros rotatorios para la obtención continua de diversas bandas del espectro (V y IRC en B/N). Aplicado en la evaluación de pastizales y áreas agrícolas. Diferenciación de niveles de agua y nutrientes en parcelas experimentales de maíz. Medición de condiciones de pastizales semiáridos. Detección de cambios estacionales en plantas agrícolas y de pastizales (en comunidades).
3. Conjunto de cuatro cámaras, no sincronizadas de tipo tubo (V y IRC en B/N). Aplicado en la evaluación de condiciones en terrenos agrícolas y de pastos. Distinción entre parcelas experimentales con maleza, sorgo, algodón y melón. Estimación de cosechas en sorgo y maíz. Distinción entre especies de plantas en pastizales. Detección de variables de pastizales (densos, quemados, hormigueros). Evaluación de producción de fitomasa en parcelas experimentales de pastos fertilizados.

4. Una sola cámara, convencional del tipo CCD, con sensibilidad al visible (V). Aplicado en la diferenciación de unidades de suelo en áreas agrícolas secas (en barbecho). Diferenciación de especies de plantas en pastizales.

5. Una sola cámara, con tres tubos, con sensibilidad al infrarrojo-color, usada para simular, mediante composiciones, película fotográfica de ese tipo. Aplicado en la diferenciación de especies de plantas cultivadas, detección de malezas en cultivos, distinción de patrones de humedad del suelo, diferenciación de los cítricos sanos de los "*estresados*", detección y mapeo de áreas de bosque infestadas de insectos, mapeo de comunidades de plantas húmedas y de montaña.

6. Falso color multispectral mediante el registro de las tres bandas en B/N, con la posibilidad de seleccionar diversos compuestos de color. Aplicado en la detección de plantas de algodón infestadas y humedad excesiva del suelo. Daños en la caña de azúcar. Detección de problemas de salinidad del suelo. Evaluación de áreas con diversos volúmenes de pasto y pastizales nativos con severamente erosionados. Diferenciación entre comunidades de plantas de pastizales y detección de áreas infestadas de hierba en pastizales. Discriminación entre tipos de vegetación en ambientes de pastizal.

7. Conjunto de cuatro cámaras que proporcionan un compuesto de color seleccionable y un multimezclador de cuatro bandas. Aplicado en la identificación de bosques (especies y daños), áreas con hierba, cultivos agrícolas, agua, humedales y suelos descubiertos con varias cantidades de cobertura.

8. Una sola cámara con sensibilidad al infrarrojo medio en, B/N. Aplicado en demostrar el efecto del alto contenido de agua en plantas suculentas. Diferenciación de niveles de fitomasa entre parcelas experimentales de pasto y separación de las severamente estresadas por sequía de las ligeramente estresadas. Diferenciación entre especies de plantas suculentas y no suculentas, entre áreas irrigadas y no irrigadas en campos de maíz y huertos de cítricos. Diferenciación entre condiciones superficiales del suelo.

Everitt *et al.* (1989), hicieron una clasificación de especies de plantas nativas (visual y espectralmente) para comparar con mapas ya existentes. Usaron imágenes de video aéreas en compuestos de infrarrojo-color y sus bandas individuales en B/N.

Stutte y Stutte (1989) usaron un sistema computarizado, para procesar modelos predictivos con imágenes de video, con fines de predicción, localización, clasificación y cuantificación de áreas estresadas en campos de cultivo. Utilizaron imágenes en el infrarrojo cercano para cultivos de algodón, soya, arroz y sorgo.

Richardson *et al.* (1989), usaron imágenes aéreas de video y valores de reflectancia tomados en el terreno que permitieron calcular valores de "índices de vegetación perpendicular", para relacionarlos con magnitudes de cosechas, así como índices de área de hojas y medidas de crecimiento de biomasa en las plantas. Las imágenes procesadas fueron tomadas con dos cámaras, con dos filtros de "*bandas angostas*" en el rojo (644-656 nm) y en infrarrojo cercano (815-827 nm).

Stutte *et al.* (1989), evaluaron diferencias en nutrientes en cultivos hortícolas, usando imágenes de video procesadas en ICAS (un procesador de imágenes), obtenidas con filtros en bandas angostas del visible e infrarrojo cercano.

Maggio *et al.* (1989), utilizaron fotografía aérea digitizada con barredor ("*escaneada*") en infrarrojo en color e imágenes aéreas de video-fijo (en color), para evaluar parcelas forestales por tipo de explotación y su correspondiente delimitación por unidades de mapeo (interpretación

estereoscópica, digitización en pantalla y clasificación no supervisada). El video-fijo fue tomado con una cámara fotográfica, que tiene integrado un CCD de muy alta resolución, la cual guarda hasta 50 imágenes en un disco óptico, ellas pueden ser transferidas a la computadora en forma de video-compuesto o en RGB.

Reising y Lydiard (1989), realizaron una revisión y comparación de algunas características de los sistemas de video multiespectrales en relación con sistemas satelitarios de imágenes (SPOT-LANDSAT). Aspectos tales como fidelidad geométrica, calidad espectral y correcciones radiométricas. Ellos concluyen que con una plataforma aérea de video hay aproximadamente 200,000 veces más fotones que pasan a través del sistema óptico de una cámara de video, que a las altitudes en que orbitan los satélites LANDSAT y SPOT. Este incremento en la cantidad de luz permite el uso de filtros de bandas espectrales más angostas.

Para terminar esta sección del Apéndice A, parece importante mencionar, algunas impresiones generales sobre los trabajos revisados, los cuales han sido tomados como referencias principales, en el aspecto de antecedentes en el uso de imágenes de video para fines de evaluación de recursos naturales:

1. En muchos casos en los que se menciona el procesamiento digital de imágenes (clasificación), no se hace referencia precisa al tipo de procedimiento seguido, ni a la exactitud relativa alcanzada en tales clasificaciones, asimismo ni el método utilizado para corroborar los resultados (fotografía aérea, mediciones en campo, etc.).
2. La mayoría de las aplicaciones realizadas corresponden a casos donde se evalúan aspectos de los recursos que son resultado de las condiciones de manejo del suelo y de ambientes muy específicos, habría que tomar con cuidado estos métodos si se busca utilizarlos en ambientes diferentes.
3. Un aspecto importante de esta revisión bibliográfica es que a partir de su lectura han surgido algunas ideas de aplicaciones y también algunas aclaraciones acerca de las posibilidades reales de uso de esta tecnología para fines de análisis multiespectral.
4. Una cosa importante queda clara, no es factible utilizar cámaras de video, del tipo de sensor CCD convencional, que tienen posibilidad sólo de captar información en el visible, como cámaras multiespectrales con bandas en el infrarrojo, la literatura especializada así lo reporta. Es decir para obtener información en el infrarrojo es necesario que se utilice ya sea el sistema de tubos de video especiales cuyas características permiten la captación en el área del espectro mencionada (ver las descripciones de los equipos en este apéndice) o bien un video sensor CCD especial con capacidad de recibir la información mencionada, semejante al utilizado en los sensores de los satélites SPOT.

Apéndice A.2

El procedimiento seguido, para la cuantificación de la relación altura-cubrimiento de campo, de la cámara de video que se utilizó en el estudio de caso número 1, se realizó de la siguiente manera: Se hicieron una serie de tomas, a diversas distancias de la cámara, 1, 2, 5, 10, 15 y 20 metros respectivamente, utilizando en todos los casos, una distancia focal de 11 mm, con la cual se obtuvo el mayor cubrimiento de campo posible. Esta distancia focal fue la que se usó en las tomas de los vuelos realizados para el monitoreo del avance de las cabeceras.

Para cada una de las distancias mencionadas se midió, haciendo puntería con una baliza, la distancia más larga del "*cuadro*" o rectángulo de cubrimiento (en el sentido de las X). Para la distancia más corta del cuadro (altura, en el sentido de las Y) se realizaron de igual manera las mediciones, sólo que en este caso se hicieron únicamente a tres diferentes distancia (1, 2 y 5 m, respectivamente). Los valores promedio de ángulos de cubrimiento obtenidos se muestran en las Tablas A.2.1 y A.2.2.

Los valores angulares que se han reportado en estas tablas son los que han sido utilizados para el cálculo de la Tabla 1.3, en la cual se marcan los valores pixel, alturas de vuelo y cubrimiento del área del terreno en m² para la cámara de video empleada y con la distancia focal de 11 mm.

Apéndice A.3 (Parte 1).

Tabla A.2.1. Valores medidos de los ángulos de cubrimiento de campo, de la cámara de video, para el lado más largo del "cuadro" de captura de las imágenes.

Dist. m	Largo m	Tangente*	Angulo* Grados
1	0.435	0.2175	12.27072
2	0.920	0.2300	12.95276
5	2.414	0.2414	13.57155
10	4.780	0.2390	13.44155
15	7.362	0.2454	13.78792
20	9.528	0.2382	13.39818

Promedio de la mitad del ángulo de cubrimiento = 13.2°
 Angulo de cubrimiento de campo = 26.4°

*LOS VALORES ANGULARES RESULTANTES DE LA TANGENTE CORRESPONDEN A LA MITAD DEL ANGULO DE CUBRIMIENTO DE CAMPO, MULTIPLIQUESE POR DOS PARA OBTENER EL VALOR COMPLETO. PARA OBTENER EL VALOR DE LA TANGENTE DIVIDASE LA MITAD DEL VALOR DE LA DISTANCIA DE CUBRIMIENTO (SEGUNDA COLUMNA) ENTRE EL VALOR DE LA DISTANCIA A LA CAMARA (PRIMERA COLUMNA).

Tabla A.2.2. Valores medidos de los ángulos de cubrimiento de campo de la cámara de video para el lado más corto del "cuadro" de captura de las imágenes.

Dist. m	Ancho m	Tangente*	Angulo* Grados
1	0.338	0.1690	9.59235
2	0.726	0.1815	10.28720
5	1.873	0.1873	10.60858

Promedio de la mitad del ángulo de cubrimiento = 10.2°
 Angulo de cubrimiento de campo = 20.3°

*LOS VALORES ANGULARES RESULTANTES DE LA TANGENTE CORRESPONDEN A LA MITAD DEL ANGULO DE CUBRIMIENTO DE CAMPO, MULTIPLIQUESE POR DOS PARA OBTENER EL VALOR COMPLETO. PARA OBTENER EL VALOR DE LA TANGENTE DIVIDASE LA MITAD DEL VALOR DE LA DISTANCIA DE CUBRIMIENTO (SEGUNDA COLUMNA) ENTRE EL VALOR DE LA DISTANCIA A LA CAMARA (PRIMERA COLUMNA).

Programa utilizado para el cálculo de coordenadas (compensadas angular y linealmente) de los puntos de control topográfico situados en los sistemas de cárcavas 1 y 2, Huasca, Hidalgo. El lenguaje utilizado es *Turbo-Basic*. Se puede utilizar tanto en poligonales abiertas como en cerradas de *n* número de lados.

```

*****
*   PROGRAMA PARA EL CALCULO DE COORDENADAS DE LOS VERTICES   *
*   DE UNA POLIGONAL CERRADA DE N LADOS.                       *
*   Autor: Jorge López-Blanco                                   *
*   Fecha de esta versión: 25 de septiembre de 1993            *
*****

-----
'Limpiar la pantalla

cls
-----

'Definición de la cantidad máxima de lados de la poligonal, en
'este caso 1000 pares de coordenadas resultantes, este valor lo
'puede definir el usuario, aumentarlo o disminuirlo de acuerdo a
'la cantidad de datos que necesite procesar.

dim x(1000),y(1000)

-----
'Aquí se define el valor de la constante g que es de 0.001 m y
'servirá para la realización de la compensación angular de las
'coordenadas de los vértices.

g=.001
-----

'Aquí se pregunta el número de lados de la poligonal y si son
'ángulos internos o externos.

print "Número de lados del poligono"
input n
print "Ángulos internos I y externos E (anotar con mayúscula)?"
input a$
for i=1 to 2*n step 2
b=b+1
-----

'Entrada de ángulos en grados minutos segundos con este formato
'si son 45 grados 03 minutos y 56.2 segundos se debe anotar
'45.03562.
    
```

```

print "Angulo ";b
input x(i)
'-----
'En esta parte se hace la conversión de grados minutos y segundos
'a decimales de grado de cada uno de los ángulos.

v=(x(i)-int(x(i)))*100
v1=int(v)/60
v2=(v-int(v))*100/3600
x(i)=int(x(i))+v1+v2
a=a+x(i)
next i
'-----

'Aquí se define el error angular de la poligonal en grados.
if a$="I" then 14
f=180*(n+2):goto 16
14 f=180*(n-2)
16 e=a-f:print "Error Angular en grados=";e
'-----

'Se introducen los valores de las distancias de los lados con un
'contador
for i=2 to 2*n step 2
c=c+1
print "Distancia ";c
input x(i)
'-----

'Aquí se hace la acumulación de las distancias de cada uno de los
'lados.
l=l+x(i)
'-----

'Enseguida calcula la corrección angular para cada uno de los
'ángulos en función de una deformación lineal máxima permitida
'de 1 mm (valor establecido por convención)
h=h+atn(g/x(i)):next i
g=g*e/h

for i=1 to 2*n step 2
x(i)=(x(i)+atn(g/x(i+1))):next i
'-----

'Se introducen el azimut y las coordenadas X e Y de partida
Print "Azimut de partida en grados y decimales de grado?"
input Azp

```

```

Print "Coordenada X de partida"
input g
Print "Coordenada Y de partida"
Input h
j=g:k=h
'-----

'Se define el azimut de cada una de las líneas de la poligonal
'en grados y decimales de grado y después lo convierte a radianes
for i=1 to 2*n step 2

Azp=Azp+x(i)+180:if Azp<360 then 40
Azp=Azp-360
if Azp<360 then 40
Azp=Azp-360
40 x(i)=Azp:x(i)=x(i)*(3.141592653589793/180):next i
'-----

'Rutina para calcular las coordenadas X e Y "No Compensadas" de
'cada uno de los vértices de la poligonal.
for i=1 to 2*n step 2

g=g+(sin(x(i))*x(i+1)):h=h+(cos(x(i))*x(i+1)):x(i)=g:x(i+1)=h
next i
'-----

'Rutina para el cálculo e impresión de la precisión de la
'poligonal y de las coordenadas de partida.
g=j-g:h=k-h:p=1/sqr((g*g)+(h*h)):g=g/l:h=h/l

Print "Precisión 1/";p

q=j:r=k

Print "Coordenadas Finales (Compensadas)"
Print "X 1=";j
Print "Y 1=";k:d=1
'-----

'Cálculo de las coordenadas compensadas de los vértices. Los
'valores del último par de coordenadas deben corresponder con los
'de partida.
for i=1 to 2*n step 2

m=m+sqr((x(i)-j)*(x(i)-j)+(x(i+1)-k)*(x(i+1)-k))
j=x(i):k=(x(i+1))
x(i)=x(i)+(m*g):x(i+1)=x(i+1)+(m*h)
d=d+1

```

```

Print "X";d;"=";x(i)
Print "Y";d;"=";x(i+1):next i:b=1:c=2
'-----
'Se calcula el azimut y distancia de los lados de la poligonal a
'partir de sus coordenadas compensadas, también se calcula la
'superficie del poligono.

Print"Azimutes y distancias a partir de coordenadas compensadas"

for i=1 to 2*n step 2

s=x(i)-q:t=x(i+1)-r:a=a+(q*x(i+1)-(x(i)*r):q=x(i):r=x(i+1)
k=180/3.141592653589793
dx2=s*s:dy2=t*t:dist=sqr(dx2+dy2)
ang=atn(s/t):ang=ang*k:ang=abs(ang)

if s>0 and t>0 then ang=ang
if s>0 and t<0 then ang=180-ang
if s<0 and t<0 then ang=180+ang
if s<0 and t>0 then ang=360-ang

Print"Az";b;"-";c;"=";ang
Print"Dist";b;"-";c;"=";dist:b=b+1:c=c+1:next i
a=abs(a/2):Print"Area de la poligonal en m² =" ;a

'Fin del programa

end
'-----

```

Apéndice A.3 (Parte 2).

Programa para el cálculo de los ángulos internos de un triángulo oblicuángulo. Se utilizó en un paso previo al cálculo de las coordenadas de los puntos de control topográfico situados en los sistemas de cárcavass 1 y 2, Huasca, Hidalgo.

El lenguaje utilizado es Turbo-Basic (Borland Software, Inc.). Este programa es útil sobre todo cuando se usa el método de levantamiento por trilateración y/o triangulación (ver texto principal).

```

'*****
'* PROGRAMA PARA CALCULAR LOS ANGULOS INTERNOS DE UN TRIANGULO *
'* A PARTIR DE LAS DISTANCIAS DE SUS TRES LADOS *
'* Autor: Jorge López-Blanco *
'* Fecha de esta versión: 23 de mayo de 1993 *
'*****
'-----
'Entrada de las distancias de los tres lados en el siguiente
'orden, primero el lado más largo, luego el mediano y al final el
'más pequeño
'-----

Print "Lado A, el más largo":Input a
Print "Lado B, el mediano":Input b
Print "Lado C, el más pequeño":Input c

'k es una constante para convertir de radianes a grados
k=57.295779513082326
'-----

p=.5*(a+b+c)
r=sqr((p-a)*(p-b)*(p-c)/p)
al=(r/(p-a)):al=atn(al):al=al*2*k
bl=(r/(p-b)):bl=atn(bl):bl=bl*2*k
cl=(r/(p-c)):cl=atn(cl):cl=c1*2*k:d1=al+bl+c1
'-----

'Impresión de los valores de los tres ángulos y de la suma de los
'tres (Valores en grados y decimales de grado)

Print "Angulo opuesto al lado A=" ;al
Print "Angulo opuesto al lado B=" ;bl
Print "Angulo opuesto al lado C=" ;cl
Print "Suma de los tres ángulos=" ;d1

'Fin del programa

end
'-----

```

Apéndice A.4

Las siguientes tablas corresponden en primer lugar al proceso de asignación de coordenadas a las imágenes de video de los Sistemas de Cárcavas 1 y 2, con cinco y tres fechas, respectivamente. Enseguida se han incluido en las tablas A.4.15 hasta la A.4.22 los resultados del procedimiento de corrección geométrica, para cada una de las ocho imágenes/fechas, mencionadas antes. En los casos en que el valor de la *sigma* es cero (7a columna), significa que solamente se tuvieron los puntos de control mínimos necesarios para realizar el procedimiento de corrección geométrica. Para ver detalles sobre los procedimientos seguidos, leer las partes 1.9.2 y 1.9.5. del texto principal.

Tablas A.4.1 a la A.4.11 Valores de diferencias en pixeles, en líneas y columnas, en relación a la recta de mejor ajuste de regresión (por mínimos cuadrados), para la asignación de coordenadas a las imágenes de la Cárcava II del Sistema 1 en las cinco fechas del análisis.

Tabla A.4.1

Vuelo Junio de 1991
Asignación de coordenadas a la imagen JUN91*

Punto	Coord. X (cm)	Coord. Y (cm)	D.Lin. (Pixel)	D.Col. (Pixel)	Tamaño Pix cm	Sigma (Pixel)
II	10000	10000	0.45	-0.44	1.195	0.86
B	9728	10202	-0.27	0.26		
D	10316	10296	-0.58	0.56		
E	10281	10572	0.39	-0.38		

*ESTA IMAGEN FUE CORREGIDA GEOMETRICAMENTE Y USADA PARA LAS MEDICIONES DEL AVANCE DE CABECERAS DE CARCAVAS (1a FECHA).

Tabla A.4.2

Vuelo Agosto de 1991
Asignación de coordenadas a la imagen AGO91*

Punto	Coord. X (cm)	Coord. Y (cm)	D.Lin. (Pixel)	D.Col. (Pixel)	Tamaño Pix cm	Sigma (Pixel)
B'	9864	10101	0.30	-0.25	1.194	0.77
C'	10158	10148	-0.81	0.66		
D	10316	10296	0.49	-0.39		
D'	10298	10434	0.47	-0.42		
E	10281	10572	-0.46	0.39		

*ESTA IMAGEN FUE CORREGIDA GEOMETRICAMENTE Y USADA PARA LAS MEDICIONES DEL AVANCE DE CABECERAS DE CARCAVAS (2da FECHA).

Tabla A.4.3

Vuelo Diciembre de 1991
Asignación de coordenadas a la imagen DIC91*

Punto	Coord. X (cm)	Coord. Y (cm)	D.Lin. (Pixel)	D.Col. (Pixel)	Tamaño Pix cm	Sigma (Pixel)
A	9670	10528	-1.04	1.73	1.293	1.64
A'	9699	10365	1.20	-1.94		
C'	10158	10148	-0.48	0.66		
D'	10298	10434	0.01	0.35		
E	10281	10572	0.32	-0.79		

*ESTA IMAGEN FUE CORREGIDA GEOMETRICAMENTE Y USADA PARA LAS MEDICIONES DEL AVANCE DE CABECERAS DE CARCAVAS (3a FECHA).

Tabla A.4.4

Vuelo Julio de 1992
Asignación de coordenadas a la imagen JUL00

Punto	Coord. X (cm)	Coord. Y (cm)	D.Lin. (Pixel)	D.Col. (Pixel)	Tamaño Pix cm	Sigma (Pixel)
II	10000	10000	-1.92	1.81	1.194	4.51
A'	9699	10365	-4.59	-2.46		
B	9728	10202	4.41	1.44		
B'	9864	10101	2.75	2.13		
C'	10158	10148	-2.77	-5.81		
D'	10298	10434	2.11	2.88		

Tabla A.4.5

Vuelo Julio de 1992
Asignación de coordenadas a la imagen JUL01

Punto	Coord. X (cm)	Coord. Y (cm)	D.Lin. (Pixel)	D.Col. (Pixel)	Tamaño Pix cm	Sigma (Pixel)
II	10000	10000	-3.07	6.48	0.999	6.69
B	9728	10202	0.16	-4.41		
B'	9864	10101	2.04	4.03		
C'	10158	10148	0.09	-8.89		
D	10316	10296	4.26	-4.27		
D'	10298	10434	-3.49	7.06		

Tabla A.4.6 Vuelo Julio de 1992
Asignación de coordenadas a la imagen JUL03*

Punto	Coord. X (cm)	Coord. Y (cm)	D.Lin. (Pixel)	D.Col. (Pixel)	Tamaño Pix cm	Sigma (Pixel)
II	10000	10000	-1.29	0.85	1.550	1.71
A'	9699	10365	-0.08	-2.25		
B	9728	10202	1.24	1.02		
B'	9864	10101	-0.52	1.44		
C'	10158	10148	0.04	-1.33		
D	10316	10296	1.38	-1.51		
D'	10298	10434	1.03	-0.71		
E	10281	10572	-1.80	2.49		

*ESTA IMAGEN FUE CORREGIDA GEOMETRICAMENTE Y USADA PARA LAS MEDICIONES DEL AVANCE DE CABECERAS DE CARCAVAS (4a FECHA).

Tabla A.4.7 Vuelo Julio de 1992
Asignación de coordenadas a la imagen JUL04

Punto	Coord. X (cm)	Coord. Y (cm)	D.Lin. (Pixel)	D.Col. (Pixel)	Tamaño Pix cm	Sigma (Pixel)
II	10000	10000	-0.98	1.43	1.546	2.10
A'	9699	10365	-0.56	-3.15		
B	9728	10202	1.54	1.85		
B'	9864	10101	-0.22	1.64		
C'	10158	10148	-0.74	-2.69		
D	10316	10296	1.50	-1.81		
D'	10298	10434	0.83	0.17		
E	10281	10572	-1.36	2.58		

Tabla A.4.8 Vuelo Diciembre de 1992
Asignación de coordenadas a la imagen DIC309*

Punto	Coord. X (cm)	Coord. Y (cm)	D.Lin. (Pixel)	D.Col. (Pixel)	Tamaño Pix cm	Sigma (Pixel)
II	10000	10000	0.37	-0.07	2.217	0.51
A	9670	10528	0.21	-0.32		
A'	9699	10365	0.19	0.62		
B	9728	10202	-0.84	-0.45		
B'	9864	10101	0.27	0.24		
D	10316	10296	-0.46	-0.37		
D'	10298	10434	0.39	0.57		
E	10281	10572	-0.12	-0.22		

*ESTA IMAGEN FUE CORREGIDA GEOMETRICAMENTE Y USADA PARA LAS MEDICIONES DEL AVANCE DE CABECERAS DE CARCAVAS (5a FECHA).

Tabla A.4.9

Vuelo Diciembre de 1992
Asignación de coordenadas a la imagen DIC3010

Punto	Coord. X (cm)	Coord. Y (cm)	D.Lin. (Pixel)	D.Col. (Pixel)	Tamaño Pix cm	Sigma (Pixel)
II	10000	10000	0.46	-0.27	2.215	0.57
A	9670	10528	0.50	-0.55		
A'	9699	10365	-0.33	0.28		
B	9728	10202	-0.17	0.11		
B'	9864	10101	-0.35	0.42		
D	10316	10296	-0.34	-0.73		
D'	10298	10434	0.76	0.60		
E	10281	10572	-0.53	0.14		

Tabla A.4.10

Vuelo Diciembre de 1992
Asignación de coordenadas a la imagen DIC3011

Punto	Coord. X (cm)	Coord. Y (cm)	D.Lin. (Pixel)	D.Col. (Pixel)	Tamaño Pix cm	Sigma (Pixel)
II	10000	10000	1.57	-0.42	1.624	1.42
A	9670	10528	0.86	-0.83		
A'	9699	10365	0.41	0.34		
B	9728	10202	-2.03	1.51		
B'	9864	10101	-0.23	-0.95		
D	10316	10296	-0.57	0.35		

Tabla A.4.11

Vuelo Diciembre de 1992
Asignación de coordenadas a la imagen DIC3012

Punto	Coord. X (cm)	Coord. Y (cm)	D.Lin. (Pixel)	D.Col. (Pixel)	Tamaño Pix cm	Sigma (Pixel)
II	10000	10000	0.18	-0.42	2.207	0.64
A	9670	10528	0.27	-0.49		
A'	9699	10365	0.08	0.43		
B	9728	10202	-0.10	0.35		
B'	9864	10101	-0.46	-0.04		
D	10316	10296	0.21	-0.42		
D'	10298	10434	0.46	1.29		
E	10281	10572	-0.64	-0.70		

Tablas A.4.12 a A.4.14. Valores de diferencias en pixeles, en líneas y columnas, en relación a la recta de mejor ajuste de regresión (por mínimos cuadrados), para la asignación de coordenadas a las imágenes del Sistema de Cárcavas 2 en las tres fechas del análisis.

Tabla A.4.12

Vuelo Agosto de 1991
Asignación de coordenadas a la imagen AGO91A

Punto	Coord. X (cm)	Coord. Y (cm)	D.Lin. (Pixel)	D.Col. (Pixel)	Tamaño Pix cm	Sigma (Pixel)
e	3347	4136	0.63	1.02	4.744	0.86
f	2953	4145	0.22	-0.58		
II	2224	4359	-0.87	-0.29		
g	1978	4843	0.88	0.91		
h	2057	5315	-0.25	-0.48		
i	2171	5874	0.43	0.21		
i'	2612	5845	-1.29	0.00		

Tabla A.4.13

Vuelo Diciembre de 1991
Asignación de coordenadas a la imagen DIC91A

Punto	Coord. X (cm)	Coord. Y (cm)	D.Lin. (Pixel)	D.Col. (Pixel)	Tamaño Pix cm	Sigma (Pixel)
d'	3610	4321	0.84	0.12	3.343	3.69
e	3347	4136	0.23	0.57		
g(n)	2141	4837	0.73	-0.32		
h	2057	5315	-0.35	0.33		
i'	2612	5845	-0.05	-0.04		

Tabla A.4.14

Vuelo Julio de 1992
Asignación de coordenadas a la imagen JUL92A

Punto	Coord. X (cm)	Coord. Y (cm)	D.Lin. (Pixel)	D.Col. (Pixel)	Tamaño Pix cm	Sigma (Pixel)
d'	3610	4321	0.40	0.30	3.872	0.88
e	3347	4136	-0.02	-0.18		
f	2953	4145	0.19	0.06		
II	2224	4359	-0.18	-0.23		
h	2057	5315	0.20	0.56		
i'	2612	5845	0.67	0.19		

Tablas A.4.15 a A.4.19 Valores de las diferencias o "residuales" en líneas y columnas, en relación a la recta de regresión por mínimos cuadrados, para la corrección geométrica de las imágenes de la Cárcava II del Sistema 1 en las cinco fechas del análisis (Modelo de corrección: Transformación Projectiva).

Tabla A.4.15

Vuelo Junio de 1991
Puntos de control para la corrección geométrica: Imagen JUN91

Punto	Coord. X (cm)	Coord. Y (cm)	D.Lin. (Pixel)	D.Col. (Pixel)	Tamaño Pix cm	Sigma (Pixel)
II	10000	10000	0.00	0.00	1.200*	0.00
B	9728	10202	0.00	0.00		
D	10316	10296	0.00	0.00		
E	10281	10572	0.00	0.00		

*EL VALOR DEL PIXEL SE IGUALO EN LAS CINCO IMAGENES/FECHAS MEDIANTE UN PROCESO DE REMUESTRO (VECINO MAS CERCANO) REALIZADO DURANTE LA CORRECCION GEOMETRICA (VER ILWIS,1992:6.124-128).

Tabla A.4.16

Vuelo Agosto de 1991
Puntos de control para la corrección geométrica: Imagen AGO91

Punto	Coord. X (cm)	Coord. Y (cm)	D.Lin. (Pixel)	D.Col. (Pixel)	Tamaño Pix cm	Sigma (Pixel)
B'	9864	10101	0.04	0.00	1.200	0.32
C'	10158	10148	-0.11	-0.01		
D	10316	10296	0.17	0.15		
D'	10298	10434	-0.16	-0.29		
E	10281	10572	0.05	0.14		

Tabla A.4.17

Vuelo Diciembre de 1991
Puntos de control para la corrección geométrica: Imagen DIC91

Punto	Coord. X (cm)	Coord. Y (cm)	D.Lin. (Pixel)	D.Col. (Pixel)	Tamaño Pix cm	Sigma (Pixel)
A	9670	10528	-0.49	0.50	1.200	1.43
A'	9699	10365	0.66	-0.47		
C'	10158	10148	-0.59	-0.09		
D'	10298	10434	0.98	0.84		
E	10281	10572	-0.57	-0.78		

Tablas A.4.20 a A.4.22 Valores de las diferencias o "residuales" en líneas y columnas, en relación a la recta de regresión por mínimos cuadrados, para la corrección geométrica de las imágenes del Sistema de Cárcavas 2 en las tres fechas del análisis (Modelo de corrección: Transformación Proyectiva).

Tabla A.4.18

Vuelo Julio de 1992
Puntos de control para la corrección geométrica: Imagen JUL03

Punto	Coord. X (cm)	Coord. Y (cm)	D.Lin. (Pixel)	D.Col. (Pixel)	Tamaño Pix cm	Sigma (Pixel)
II	10000	10000	0.01	-0.61	1.200	0.54
A'	9699	10365	-0.03	-0.24		
B	9728	10202	0.24	0.16		
B'	9864	10101	-0.33	0.27		
C'	10158	10148	0.15	0.77		
D	10316	10296	-0.26	-0.10		
D'	10298	10434	0.52	-0.64		
E	10281	10572	-0.31	0.38		

Tabla A.4.19

Vuelo Diciembre de 1992
Puntos de control para la corrección geométrica: Imagen DIC309

Punto	Coord. X (cm)	Coord. Y (cm)	D.Lin. (Pixel)	D.Col. (Pixel)	Tamaño Pix cm	Sigma (Pixel)
II	10000	10000	0.31	-0.01	1.200	0.56
A	9670	10528	0.10	-0.35		
A'	9699	10365	0.18	0.57		
B	9728	10202	-0.71	-0.46		
B'	9864	10101	0.29	0.31		
D	10316	10296	-0.54	-0.54		
D'	10298	10434	0.39	0.54		
E	10281	10572	-0.01	-0.07		

Tabla A.4.20

Vuelo Agosto de 1991
Asignación de coordenadas a la imagen AGO91ACO

Punto	Coord. X (cm)	Coord. Y (cm)	D.Lin. (Pixel)	D.Col. (Pixel)	Tamaño Pix cm	Sigma (Pixel)
e	3347	4136	0.63	1.02	4.000	0.84
f	2953	4145	0.22	-0.58		
II	2224	4359	-0.87	-0.29		
g	1978	4843	0.88	0.91		
h	2057	5315	-0.25	-0.48		
i	2171	5874	0.43	0.21		
i'	2612	5845	-1.29	0.00		

Tabla A.4.21

Vuelo Diciembre de 1991
Asignación de coordenadas a la imagen DIC91ACO

Punto	Coord. X (cm)	Coord. Y (cm)	D.Lin. (Pixel)	D.Col. (Pixel)	Tamaño Pix cm	Sigma (Pixel)
d'	3610	4321	0.84	0.12	4.000	0.74
e	3347	4136	0.23	0.57		
g(n)	2141	4837	0.73	-0.32		
h	2057	5315	-0.35	0.33		
i'	2612	5845	-0.05	-0.04		

Tabla A.4.22

Vuelo Julio de 1992
Asignación de coordenadas a la imagen JUL92ACO

Punto	Coord. X (cm)	Coord. Y (cm)	D.Lin. (Pixel)	D.Col. (Pixel)	Tamaño Pix cm	Sigma (Pixel)
d'	3610	4321	0.40	0.30	4.000	0.54
e	3347	4136	-0.02	-0.18		
f	2953	4145	0.19	0.06		
II	2224	4359	-0.18	-0.23		
h	2057	5315	0.20	0.56		
i'	2612	5845	0.67	0.19		

Apéndice A.5

La Tabla A.5.1 se ha puesto como ejemplo de los resultados de calcular las diferencias entre las distancias radiales medidas, desde el punto central de la *Imagen de Calibración* D1T2/17/Feb/1993, con respecto a las distancias radiales "reales" de una cuadrícula geoméricamente perfecta, esto con fines de cuantificar la distorsión resultante en las imágenes de video, utilizando una distancia focal de 11 mm.

Dicha distancia fue la misma utilizada, durante los vuelos para el registro de las tomas, las cuales fueron realizadas para evaluar el fenómeno del avance de la erosión, en las cabeceras de las cárcavas monitoreadas en el área de estudio.

Esta *Imagen de Calibración* resultó con 560 puntos de control (en la tabla sólo se presentan los primeros 100 puntos) cuyas coordenadas arbitrarias X y Y en unidades pixel, están en las columnas dos y tres respectivamente (ver texto principal acerca del sistema de coordenadas utilizado). El código de los puntos está en la columna uno. En la columna cuatro, los valores de distancia radial de la imagen de calibración (*DRadl ImCalib*) y en la columna cinco los valores de la distancia radial "real" (*DRadl Real*), estas dos últimas columnas también en unidades pixel.

Las diferencias marcadas en unidades pixel en la columna seis de dicha tabla corresponden a la resta entre los valores de distancia radial de la *Imagen de Calibración* (columna cuatro *DRadl ImCalib*) menos el valor de la distancia radial "real" (columna cinco *DRadl Real*).

Es decir, si el valor de diferencia es negativo, esto significa que esa cantidad de pixeles hacen falta agregar (aumentar y desplazar) a la distancia radial medida en la *Imagen de Calibración*, para que el pixel del punto de control esté en la posición correcta.



BIBLIOTECA
DR. JORGE A. VIVO

Tabla A.5.1 Diferencias entre distancias radiales medidas desde el punto central de la *Imagen de Calibración* D1T2/17/Feb/1993 con respecto a las distancias radiales "reales" de una cuadrícula geoméricamente perfecta.

No.	X	Y	DRadl	DRadl	Difer	No.	X	Y	DRadl	DRadl	Difer
Pto	Px	Px	ImCalib	Real	en Px	Pto	Px	Px	ImCalib	Real	en Px
1	21	276	304.79	317.47	-12.68	51	65	436	323.00	334.41	-11.41
2	21	299	308.13	320.93	-12.80	52	66	162	270.42	278.55	-8.14
3	21	323	313.38	327.74	-14.36	53	66	184	264.66	272.54	-7.88
4	21	345	319.71	332.76	-13.05	54	66	459	336.48	350.54	-14.05
5	21	368	327.77	342.57	-14.80	55	67	116	286.67	299.57	-12.90
6	21	391	337.21	350.54	-13.32	56	67	139	277.25	284.44	-7.19
7	22	207	304.14	315.72	-11.59	57	68	71	308.42	320.93	-12.51
8	22	231	302.24	312.21	-9.97	58	68	94	296.20	305.05	-8.84
9	22	253	302.17	312.21	-10.04	59	69	26	334.83	350.54	-15.70
10	22	413	346.56	362.92	-16.36	60	69	49	320.41	332.76	-12.35
11	22	436	358.40	374.90	-16.49	61	86	299	244.50	251.46	-6.96
12	23	162	311.71	322.64	-10.94	62	86	323	251.09	257.97	-6.88
13	23	185	306.54	319.20	-12.67	63	87	207	239.72	247.03	-7.31
14	23	458	369.90	387.93	-18.03	64	87	231	237.30	247.03	-9.73
15	24	117	325.39	336.06	-10.67	65	87	253	237.21	247.03	-9.82
16	24	139	317.52	331.09	-13.58	66	87	277	239.43	247.03	-7.60
17	25	94	334.07	350.54	-16.47	67	87	346	258.41	266.39	-7.98
18	26	49	355.58	368.96	-13.37	68	87	368	267.94	278.55	-10.61
19	26	71	344.08	355.23	-11.16	69	87	392	279.95	290.20	-10.26
20	27	27	367.24	387.93	-20.69	70	87	415	292.84	303.23	-10.40
21	43	231	281.26	290.20	-8.95	71	87	437	306.28	317.47	-11.19
22	43	253	281.18	290.20	-9.03	72	87	460	321.34	334.41	-13.07
23	43	277	283.05	293.98	-10.94	73	88	139	257.90	266.39	-8.49
24	43	299	286.53	299.57	-13.04	74	88	161	249.84	257.97	-8.13
25	43	323	292.17	303.23	-11.07	75	88	184	243.26	249.26	-5.99
26	43	345	298.94	310.43	-11.49	76	90	48	304.60	317.47	-12.87
27	43	368	307.55	319.20	-11.65	77	90	71	290.41	299.57	-9.15
28	43	391	317.59	331.09	-13.50	78	90	94	277.41	284.44	-7.03
29	43	414	328.94	342.57	-13.63	79	90	116	266.24	276.56	-10.32
30	44	184	286.15	295.86	-9.71	80	91	26	318.40	331.09	-12.69
31	44	207	282.30	293.98	-11.68	81	108	300	223.39	226.02	-2.62
32	44	436	340.07	352.11	-12.04	82	108	347	239.73	247.03	-7.30
33	44	458	353.02	368.96	-15.93	83	108	369	250.06	257.97	-7.90
34	45	139	297.75	310.43	-12.68	84	109	207	217.99	223.56	-5.57
35	45	162	290.52	299.57	-9.05	85	109	231	215.33	223.56	-8.22
36	46	94	315.41	327.74	-12.33	86	109	253	215.23	218.56	-3.33
37	46	117	305.22	317.47	-12.25	87	109	277	217.67	223.56	-5.89
38	47	49	338.18	352.11	-13.93	88	109	323	229.40	233.23	-3.83
39	47	72	325.53	342.57	-17.04	89	109	392	261.58	270.51	-8.92
40	48	27	350.47	362.92	-12.45	90	109	415	275.33	284.44	-9.10
41	64	323	272.03	282.49	-10.46	91	109	438	290.26	299.57	-9.31
42	64	345	279.29	290.20	-10.91	92	110	139	237.93	247.03	-9.10
43	64	368	288.49	299.57	-11.08	93	110	161	229.17	233.23	-4.06
44	65	207	261.49	270.51	-9.02	94	110	184	221.98	226.02	-4.03
45	65	231	259.28	268.46	-9.18	95	110	460	304.77	317.47	-12.70
46	65	253	259.19	266.39	-7.20	96	111	116	247.99	253.65	-5.66
47	65	277	261.22	270.51	-9.28	97	112	26	303.37	315.72	-12.35
48	65	299	264.98	272.54	-7.55	98	112	48	288.04	299.57	-11.52
49	65	391	298.30	310.43	-12.13	99	112	70	273.63	282.49	-8.86
50	65	415	310.91	322.64	-11.73	100	112	94	259.12	266.39	-7.27

Apéndice A.6

En este apéndice se han incluido las Figuras A.6.1 a A.6.4, en las cuales se grafican, en el eje de las X, los valores de distancia radial en pixeles desde el centro de la imagen. En el de las Y, los valores en porcentaje de la diferencia entre distancias radiales de las *Imágenes de Calibración* con respecto a las "reales". Esto para cada una de las tres *Imágenes de Calibración* y para el conjunto de todos los puntos de control.

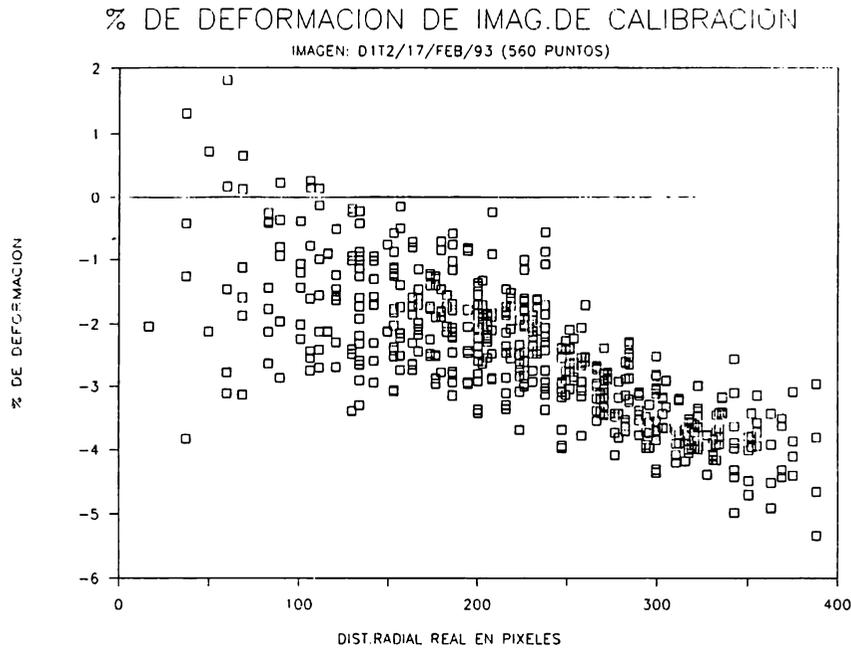


Figura A.6.1 Porcentaje de deformación de la *Imagen de Calibración* D1T2/17/Feb/1993, con respecto a la distancia radial en pixeles. Los valores negativos indican un % de "déficit" en las distancias radiales de dicha imagen.

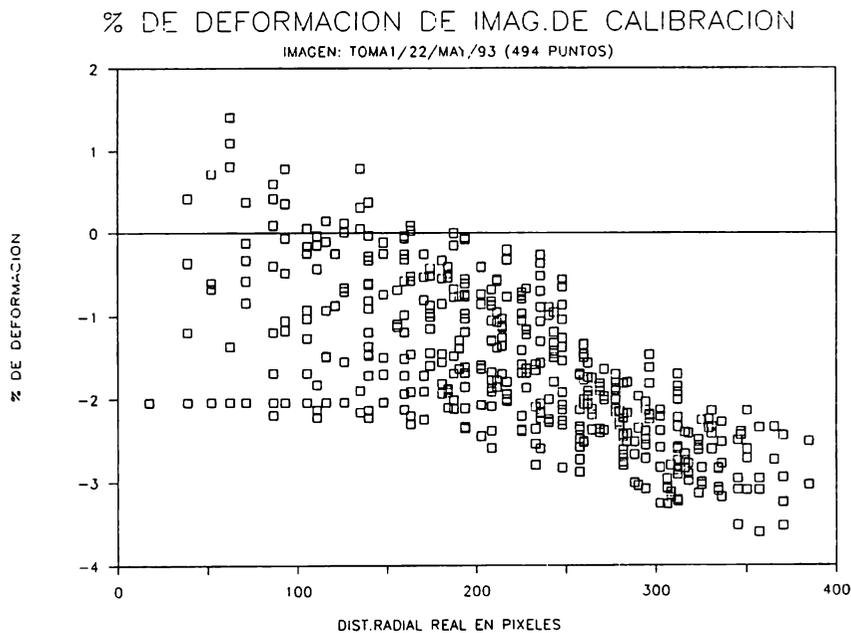


Figura A.6.2 Porcentaje de deformación de la *Imagen de Calibración* Toma1/22/May/1993, con respecto a la distancia radial en pixeles. Los valores negativos indican un % de "déficit" en las distancias radiales de dicha imagen.

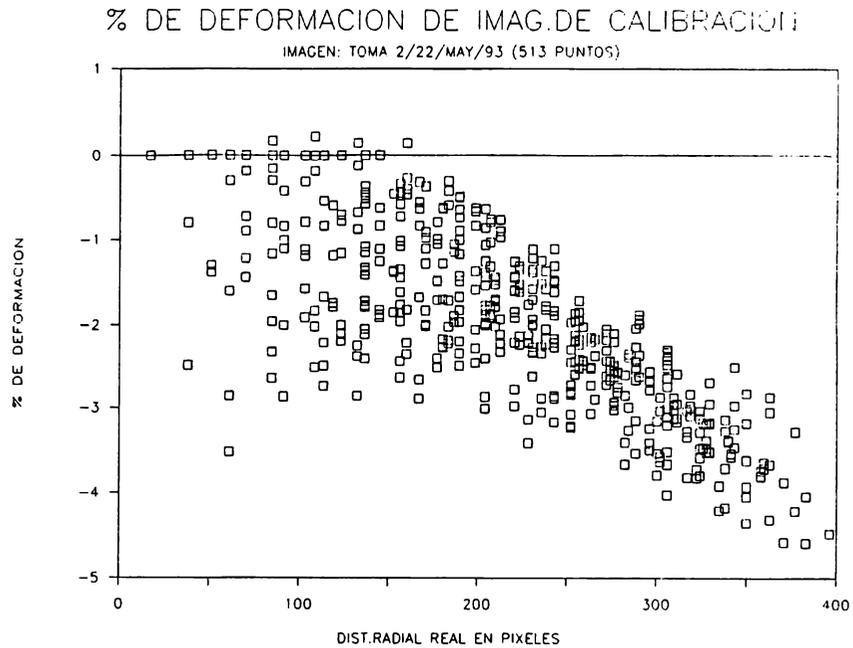


Figura A.6.3 Porcentaje de deformación de la *Imagen de Calibración Toma2/22/May/1993*, con respecto a la distancia radial en pixeles. Los valores negativos indican un % de "déficit" en las distancias radiales de dicha imagen.

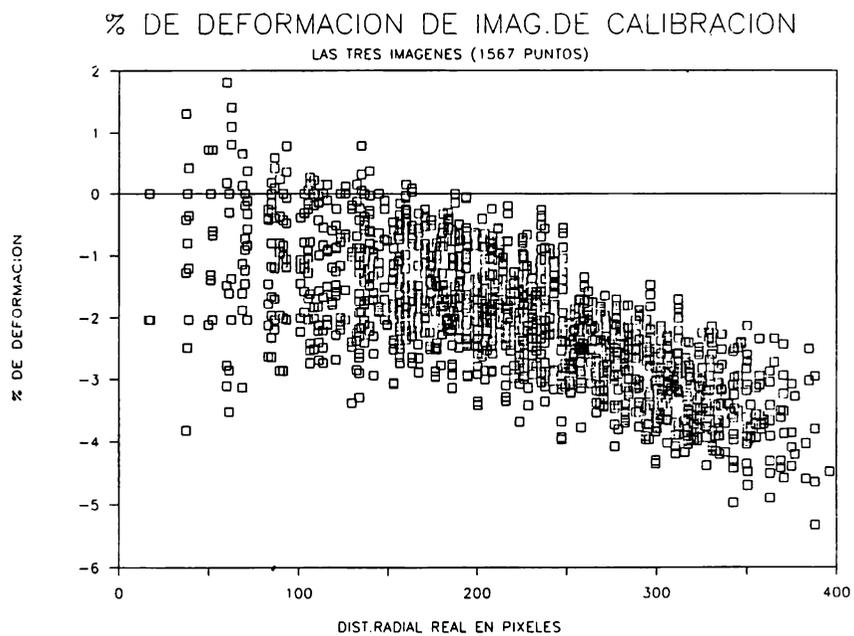


Figura A.6.4 Porcentaje de deformación con respecto a la distancia radial en pixeles, para las tres *Imágenes de Calibración*. Los valores negativos indican un % de "déficit" en las distancias radiales.

Apéndice A.7

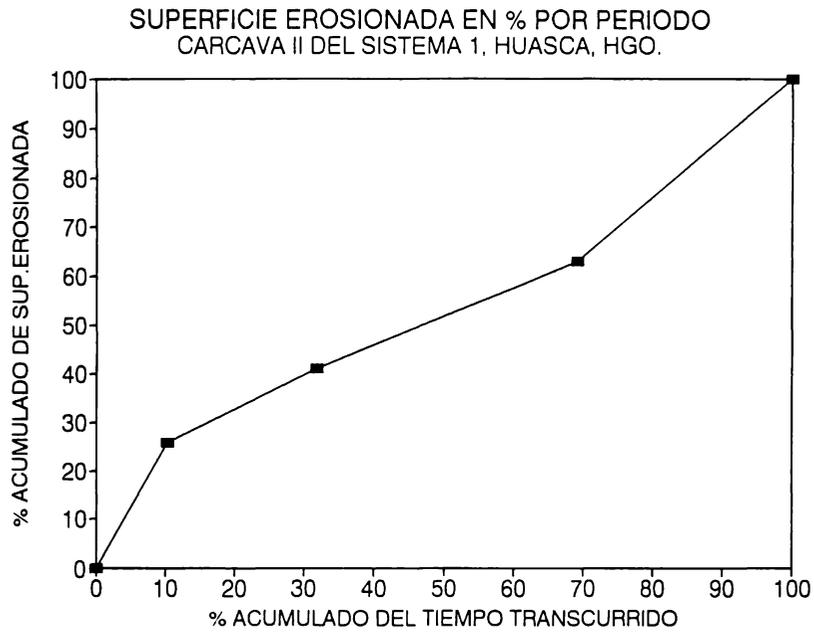


Figura A.7.1 Superficie erosionada en cm^2 en la cabecera de la cárcava II del Sistema 1, para cada uno de los cuatro periodos. En la base de cada barra se colocó el número de días del período respectivo.

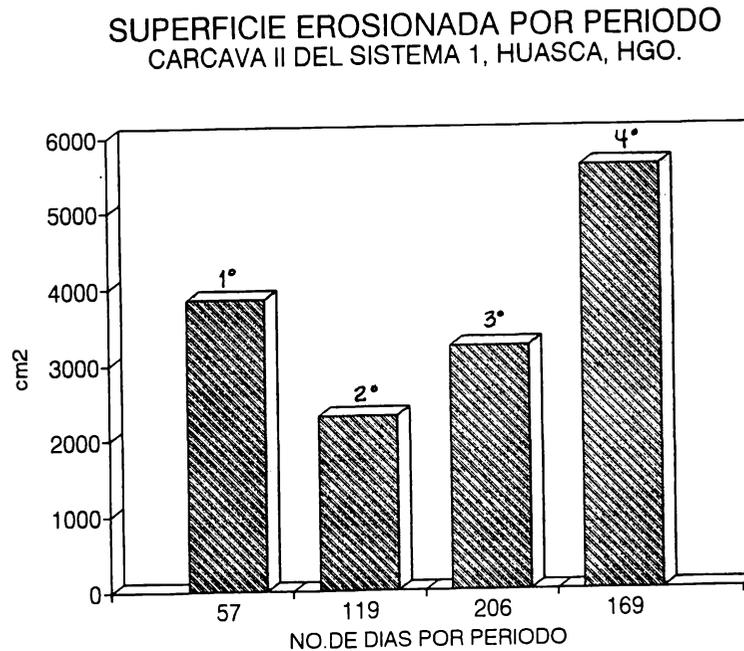


Figura A.7.2 Superficie erosionada en la cabecera de la cárcava II del Sistema 1 (acumulada en % con respecto al total). En el eje X está el valor de porcentaje acumulado del tiempo transcurrido.

Apéndice B

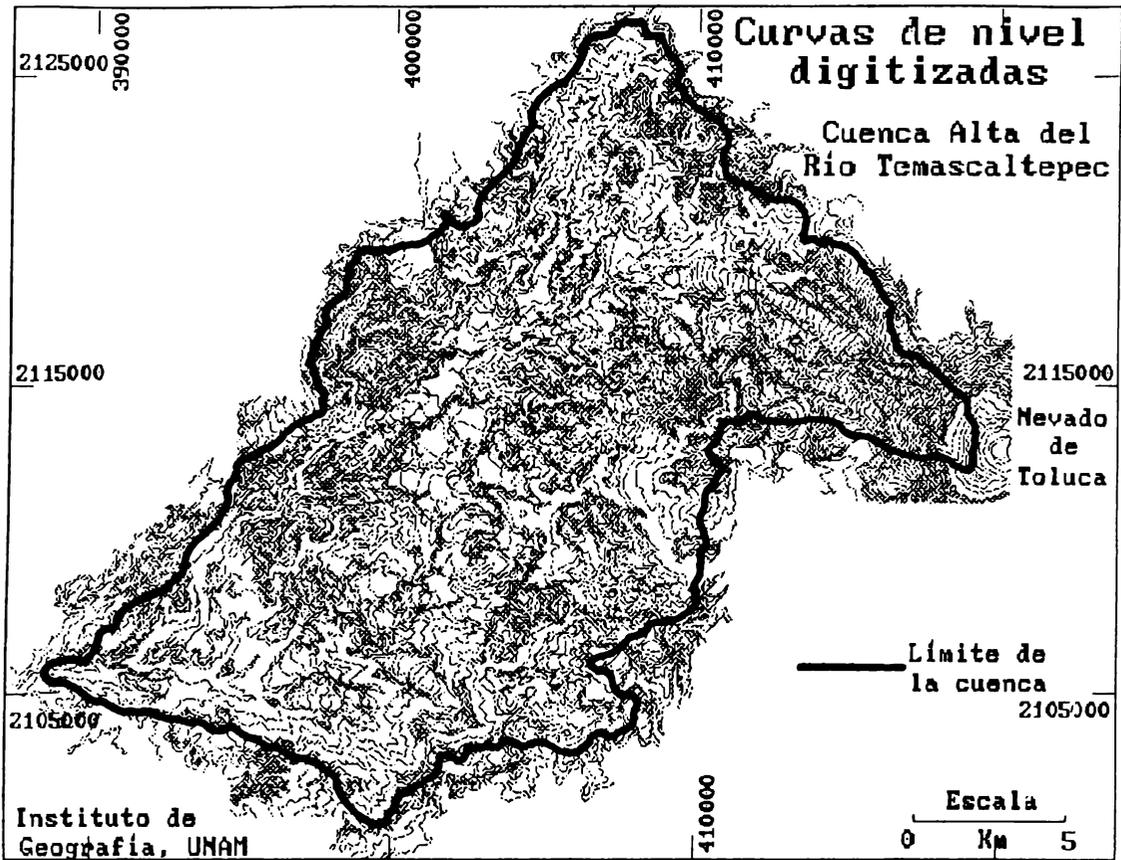


Figura B.1 Curvas de nivel a cada 20 m digitizadas para la generación del modelo digital del terreno (MDT).

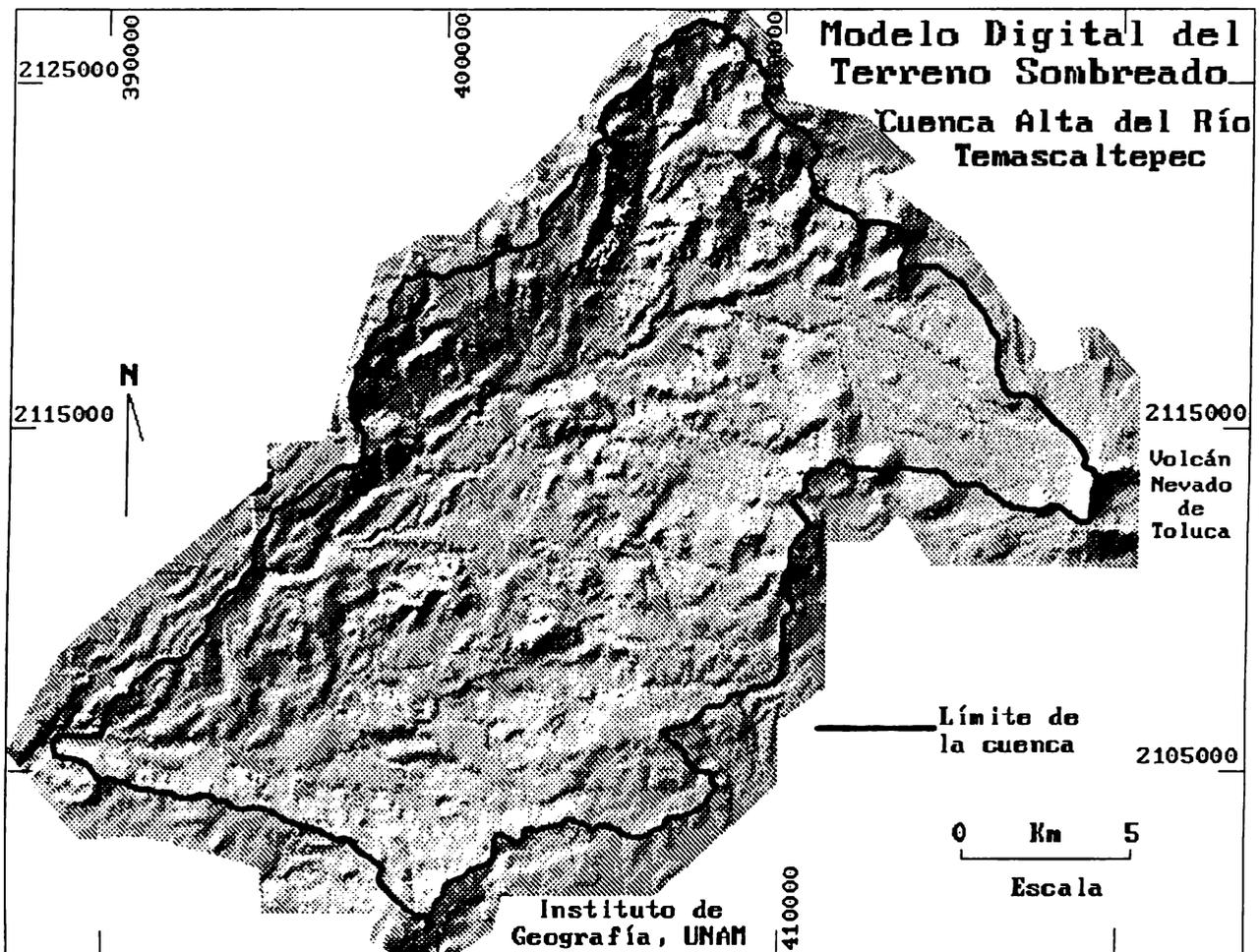


Figura B.2 Modelo digital del terreno sombreado con fuente de iluminación desde el noroeste.

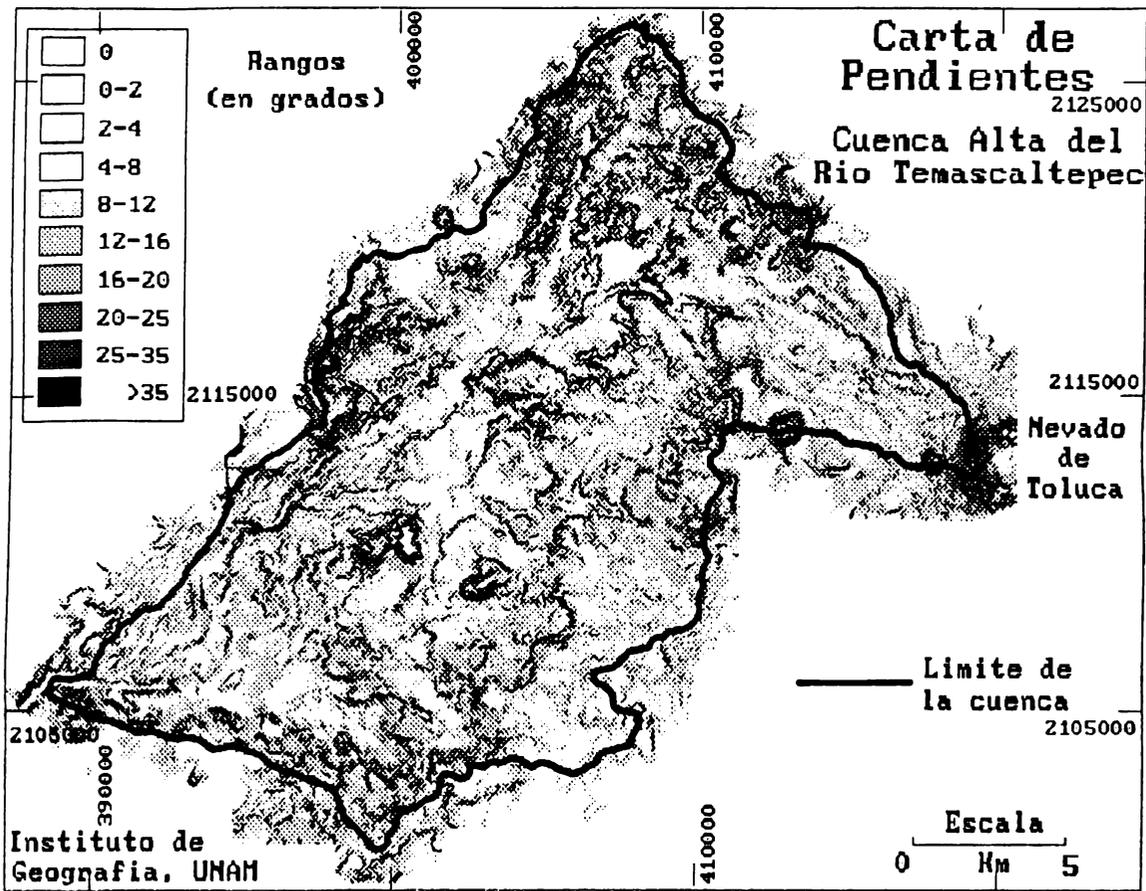


Figura B.3 Mapa de pendientes por intervalos en grados.

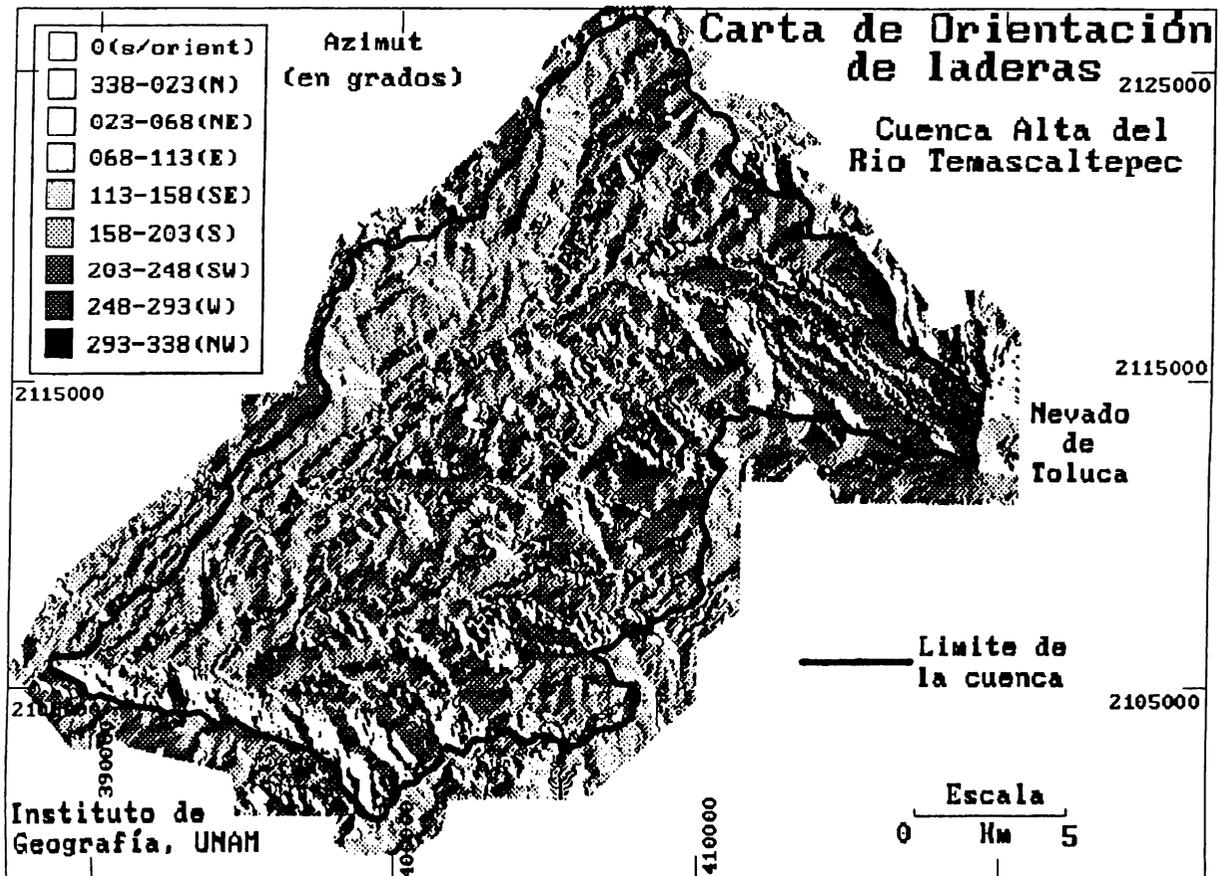


Figura B.4 Mapa de orientación de laderas por intervalos azimutales.

Apéndice C

Apéndice C.1

Resultados posteriores al estudio de caso 3.

Los resultados expuestos en el estudio de caso 3 (unidades ambientales delimitadas) sirvieron como base geográfica o espacial para su consideración en fases posteriores a la regionalización, dentro del estudio de ordenamiento territorial del municipio de Los Cabos. Los resultados que se muestran a continuación se obtuvieron en una etapa siguiente a la explicada en el texto principal de la tesis. La participación del autor en esa etapa fue indirecta, sin embargo para la determinación de la aptitud de uso del suelo, obtenida mediante los análisis estadísticos mencionados en la sección 3.7, se tomaron en cuenta las bases de datos (tablas integradas en este Apéndice), que caracterizan individualmente, a cada unidad ambiental delimitada. Dichas tablas fueron obtenidas mediante la aplicación de funciones de *cruzamiento* en el SIG.

En esta segunda fase fue posible definir y agrupar estadísticamente cuatro conjuntos de unidades geomorfológico-ambientales (paisajes terrestres) con diferentes aptitudes de uso del suelo, considerando cuatro políticas o estrategias generales para la planificación del aprovechamiento de los recursos: *conservación, aprovechamiento, restauración y protección del medio natural*. Especialistas en diversas disciplinas naturales y socioeconómicas identificaron diez usos del suelo: 1. Agrícola, 2. Asentamientos humanos, 3. Cinegético, 4. Forestal, 5. Aprovechamientos hidráulicos, 6. Industrial, 7. Pecuario, 8. Pesquero, 9. Preservación de la naturaleza, 10. Turismo (SEDUE-OEA, 1992:19).

Para cada uno de los diez tipos de uso detectados, se elaboró una matriz de 57 variables por 32 paisajes terrestres. En las matrices resultantes se codificaron la presencia o la ausencia de características o niveles deseables, para cada una de las variables consideradas. En la siguiente fase se ordenaron las 57 variables según su importancia para el uso en cuestión.

Por ejemplo, para el *uso turístico* las variables más importantes fueron la presencia de agua potable y electricidad, la infraestructura hotelera, el substrato y la pendiente marina, las comunicaciones aéreas, terrestres y a distancia. Para el *uso agrícola*, en cambio, las variables más importantes fueron el número de pozos de riego, la población ocupada del sector primario, los rendimientos agrícolas, el tipo del acuífero, la calidad del agua, las técnicas de manejo del agua, la infraestructura agropecuaria, el tipo de suelo y la inversión financiera.

Para cada uno de esos tipos de uso del suelo se elaboró una matriz en la cual se registraron presencias-ausencias de 57 variables (tomadas como elementos de descripción de la calidad del ambiente, ver la lista completa de variables en la Tabla C.11) para cada una de las 32 unidades de paisaje descritas en la regionalización ecológica. Estas variables ambientales se refieren a características físicas del terreno, infraestructura, características biológicas, elementos para la conservación, población y salud, manejo y producción agrícola, principalmente.

En estas matrices de uso del suelo, las 57 variables fueron calificadas por presencia-ausencia de condiciones propicias, según su importancia para la aptitud en cuestión, de acuerdo a lo establecido por los especialistas de cada disciplina (cada uno de los 10 usos del suelo, ver Tabla C.11). El resultado indicaba una aptitud relativa para cada una de las 32 unidades de paisaje. Sobre esa matriz de aptitud se realizaron tres tipos de análisis multivariados para por un lado generar los grupos y por otro para definir sus aptitudes de uso del suelo, estos análisis fueron: 1. análisis de componentes principales, 2. análisis factorial de correspondencias, y 3. análisis de

cúmulos o clasificación numérica (SEDUE-OEA, 1992:23-28, ver Figura C.16).

En los resultados de los dos primeros análisis (componentes principales y de correspondencias) se definió claramente que la pendiente del terreno permitió separar a las unidades ambientales 050101, 050301, 050302, 050304, 050401, 050403 y 050713 de las unidades 050105, 050303, 050305, 050306, 050501 y 050704. En el primer grupo se presentan predominantemente ambientes de sierras y cañones (en las partes altas de la Sierra de la Laguna), con buena aptitud para usos cinegéticos, forestal, de preservación de la naturaleza y de aprovechamientos hidráulicos. Al segundo grupo le corresponden de manera general paisajes en piedemontes y lomeríos con buena aptitud para los usos pecuario, agrícola, industrial y de asentamientos humanos.

Así se detectaron cuatro grupos de unidades ambientales con diferentes aptitudes:

Grupo 1. Unidades ambientales cuya aptitud principal es el uso turístico y secundariamente el uso pesquero (Paisajes: 050101, 050301, 050302, 050304, 050401, 050403 y 050712).

Grupo 2. Unidades ambientales cuya aptitud principal es el uso agrícola, ganadero, industrial y de asentamientos humanos (Paisajes: 050105, 050303, 050305, 050306, 050501, 050704).

Grupo 3. Unidades ambientales cuya aptitud es intermedia entre uso turístico costero y los usos conservacionistas de baja intensidad y poca demanda sobre el ambiente (preservación de la naturaleza, mantenimiento de los recursos hidráulicos, actividades cinegéticas y uso forestal, Paisajes: 050102, 050104, 050106, 050402 y 050503).

Grupo 4 . Unidades ambientales cuya aptitud principal son los usos conservacionistas de baja intensidad y poca demanda sobre el ambiente (preservación de la naturaleza, mantenimiento de los recursos hidráulicos, actividades cinegéticas y uso forestal, Paisajes: 050103, 050107, 050502, 050701, 050702, 050703, 050705, 050706, 050707, 050709, 050708, 050711, 050710 y 050713).

En la Figura C.15 del Apéndice C se ha incluido el mapa final de aptitud de uso del suelo, en el cual se han diferenciado cada uno de los cuatro grupos mencionados.

Tabla C.1 Base de datos resultado del *cruzamiento* entre unidades ambientales y altitudes

Paisaje	Media*	Máxima	Mínima	Mediana	Predomin.
050101	209	600	1	40	200
050102	98	517	1	8	40
050103	400	780	20	80	500
050104	165	600	1	20	200
050105	210	514	1	60	200
050106	90	200	1	20	100
050107	309	500	129	200	300
050301	188	500	1	17	200
050302	124	326	1	12	200
050303	280	500	150	204	250
050304	131	400	1	24	200
050305	201	458	80	120	200
050306	107	300	36	50	120
050401	191	384	1	48	300
050402	178	400	1	28	200
050403	217	539	1	40	200
050501	206	600	1	35	200
050502	161	384	1	21	200
050503	159	500	1	14	100
050701	509	1000	120	267	500
050702	455	900	120	258	500
050703	693	1400	200	446	600
050704	448	1000	96	200	400
050705	881	1910	180	400	1000
050706	484	900	174	300	500
050707	607	1150	200	400	500
050708	880	1433	363	600	1100
050709	739	1450	384	482	600
050710	1002	2090	190	400	1000
050711	959	1900	200	475	400
050712	306	900	1	70	200
050713	442	700	263	373	400

*VALORES EN m SOBRE EL NIVEL DEL MAR.

Tabla C.2 Base de datos resultado del *cruzamiento* entre unidades ambientales y pendiente por pixel

Paisaje	Media*	Máxima	Mínima	Mediana	Predomin.
050101	1.8	28	0	0	1
050102	1.9	23	0	0	1
050103	8.5	42	0	0	3
050104	4.0	39	0	0	3
050105	1.8	12	0	0	2
050106	4.7	28	0	0	3
050107	3.1	30	0	0	2
050301	2.9	35	0	0	1
050302	1.7	22	0	0	1
050303	3.6	23	0	0	1
050304	1.6	18	0	0	1
050305	2.7	37	0	0	1
050306	2.4	34	0	0	1
050401	1.8	10	0	0	1
050402	4.3	24	0	0	3
050403	4.3	30	0	0	3
050501	3.0	23	0	0	2
050502	4.9	23	0	0	4
050503	3.0	20	0	0	3
050701	13.9	44	0	0	16
050702	8.5	34	0	0	4
050703	13.1	48	0	1	7
050704	7.5	36	0	0	6
050705	17.9	68	0	1	15
050706	8.3	40	0	1	5
050707	9.9	39	0	0	7
050708	12.7	52	0	2	16
050709	10.4	46	0	1	7
050710	15.0	56	0	0	16
050711	11.7	40	0	1	9
050712	5.2	35	0	0	3
050713	4.1	30	0	0	2

*VALORES DE PENDIENTE EN GRADOS.

Tabla C.3 Intervalos de pendiente en grados por unidad de paisaje terrestre en %.

Unidades	0-2*	2-4	4-8	8-16	16-32	32-68	Total
050101	77.1	17.5	4.1	1.1	0.3	0.0	100
050102	75.7	18.8	4.4	1.0	0.1	0.0	100
050103	21.1	15.8	24.8	22.7	15.2	0.3	100
050104	35.0	39.1	18.5	5.3	2.1	0.1	100
050105	82.2	16.3	1.3	0.2	0.0	0.0	100
050106	27.9	32.2	27.9	9.2	2.7	0.0	100
050107	55.2	30.6	8.9	3.8	1.5	0.0	100
050301	63.7	20.8	8.8	5.1	1.5	0.0	100
050302	79.9	13.5	4.6	1.7	0.3	0.0	100
050303	58.0	18.4	12.8	8.8	1.9	0.0	100
050304	79.8	12.3	6.3	1.6	0.1	0.0	100
050305	68.9	15.4	8.9	5.3	1.5	0.0	100
050306	77.9	14.9	4.7	1.0	1.4	0.1	100
050401	84.8	11.6	3.4	0.2	0.0	0.0	100
050402	27.2	41.0	22.6	6.9	2.3	0.0	100
050403	25.2	43.6	22.9	6.2	2.0	0.0	100
050501	51.0	34.2	11.1	3.3	0.4	0.0	100
050502	15.5	40.2	35.1	8.3	0.9	0.0	100
050503	41.7	44.6	12.1	1.5	0.1	0.0	100
050701	10.1	6.7	16.5	29.0	34.9	2.8	100
050702	15.5	16.1	25.9	29.8	12.5	0.2	100
050703	4.9	7.6	22.3	35.5	26.8	3.0	100
050704	12.9	16.0	36.8	28.3	6.1	0.0	100
050705	1.6	2.2	10.5	35.2	43.8	6.7	100
050706	8.9	16.5	37.6	27.1	9.5	0.5	100
050707	13.4	8.9	24.6	34.4	18.4	0.2	100
050708	4.3	5.7	19.2	44.9	25.1	0.8	100
050709	7.6	10.2	29.1	36.7	15.7	0.7	100
050710	5.5	5.8	13.2	35.5	36.9	3.1	100
050711	8.2	8.5	19.9	39.5	22.8	1.0	100
050712	24.4	37.0	21.6	13.3	3.7	0.0	100
050713	36.1	33.3	20.7	8.4	1.5	0.0	100

*VALORES DE LÍMITES DE INTERVALO DE PENDIENTE EN GRADOS.

Tabla C.4 Intervalos de orientación de laderas por unidad de paisaje terrestre en %.

Unidad	(N)	(NE)	(E)	(SE)	(S)	(SW)	(W)	(NW)	S/Ori	Tot
050101	14.0	11.4	11.7	6.3	7.7	9.0	21.8	15.1		3.0100
050102	27.4	17.0	11.5	5.6	4.6	3.8	10.3	17.4		2.3100
050103	14.2	10.5	13.1	11.2	12.9	9.6	13.6	11.4		3.5100
050104	6.2	13.2	29.1	24.0	14.1	4.7	3.8	3.6		1.3100
050105	2.1	1.6	3.8	6.4	26.0	29.7	22.6	5.8		2.1100
050106	10.9	8.5	14.9	9.4	16.3	13.6	13.7	9.8		2.8100
050107	4.9	8.3	18.8	19.6	23.0	11.9	7.5	3.9		2.1100
050301	8.4	15.5	37.8	19.5	8.6	2.1	2.1	3.5		2.4100
050302	15.4	15.7	17.9	19.7	15.6	3.4	3.5	7.7		1.2100
050303	8.8	15.6	34.5	27.4	9.7	1.5	0.6	1.5		0.5100
050304	9.9	12.3	17.9	16.4	14.8	10.2	7.1	5.2		6.2100
050305	10.9	16.9	25.4	22.3	8.6	3.4	5.6	6.6		0.4100
050306	4.0	17.4	41.5	26.6	4.8	1.5	1.1	3.0		0.0100
050401	0.4	0.4	2.3	36.8	47.3	10.3	2.4	0.1		0.1100
050402	5.4	11.7	18.9	21.0	20.3	11.8	6.0	4.3		0.6100
050403	5.6	9.3	20.6	22.1	20.6	10.8	6.3	3.1		1.6100
050501	6.6	1.3	3.6	6.7	10.0	17.4	33.4	20.7		0.3100
050502	5.7	3.5	1.6	2.2	8.8	25.4	42.4	10.3		0.1100
050503	4.0	2.9	5.9	13.4	21.6	23.1	18.9	9.5		0.5100
050701	14.2	10.0	12.0	13.6	18.3	11.2	8.2	11.5		1.0100
050702	15.6	15.2	11.0	14.1	23.6	9.5	3.7	7.2		0.2100
050703	12.2	12.2	10.3	14.2	14.8	11.5	11.2	13.3		0.3100
050704	9.0	3.4	5.3	11.1	16.2	18.6	20.6	15.4		0.4100
050705	15.4	15.5	9.6	11.4	16.0	12.8	8.7	10.6		0.1100
050706	8.8	4.0	8.2	11.3	7.5	14.6	22.4	22.7		0.5100
050707	17.1	11.9	12.1	14.0	18.5	7.6	5.1	13.8		0.1100
050708	13.4	18.0	16.8	15.2	16.4	7.1	4.7	8.3		0.0100
050709	9.0	8.4	13.1	13.3	22.8	17.2	8.8	6.7		0.7100
050710	15.1	14.2	9.9	11.2	15.3	13.7	10.1	10.2		0.2100
050711	11.7	12.9	16.8	17.3	22.0	10.7	5.2	2.6		0.9100
050712	15.3	22.0	21.3	13.7	13.2	5.1	3.1	5.8		0.4100
050713	7.1	3.4	7.7	15.2	23.0	14.5	15.8	11.9		1.3100

INTERVALOS DE AZIMUTH PARA LA DEFINICION DE ORIENTACION DE LADERAS: 337.5-23.5 (N), 22.5-67.5 (NE), 67.5-112.5 (E), 112.5-157.5 (SE), 157.5-202.5 (S), 202.5-247.5 (SW), 247.5-292.5 (W), 292.5-337.5 (NW), S/ORI= SIN ORIENTACION. LOS VALORES DE INTERVALOS AZIMUTALES ESTAN EN GRADOS SEXAGESIMALES.

Tabla C.5 Tipos de vegetación y usos del suelo por unidad de paisaje terrestre en %.

Unidades	Bg	Ch	MC	MSe	MSSi	Mz	Pa	Pc	Pi	Pq	Q	Qp	R	SBc	Sv	Ta	Vg	Total
050101	0.0	0.0	3.1	8.3	51.0	9.9	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	25.8	0.0	0.6	0.3	100
050102	0.0	0.0	0.0	10.5	61.3	9.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	17.5	1.1	0.0	0.0	100
050103	0.0	0.0	1.0	0.0	16.4	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	82.2	0.0	0.0	0.0	100
050104	0.0	0.0	0.0	0.0	63.9	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	36.0	0.0	0.0	0.0	100
050105	0.0	0.0	1.3	3.4	70.4	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	22.0	0.0	0.8	0.1	100
050106	0.0	0.0	0.0	0.0	42.9	2.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	52.9	0.0	0.0	1.7	100
050107	0.0	0.0	0.0	0.0	12.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	87.2	0.0	0.0	0.0	100
050301	0.0	0.0	0.0	0.0	53.7	4.3	0.0	1.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	38.8	0.0	0.8	0.1	100
050302	0.0	0.0	0.0	0.0	27.1	19.4	0.0	3.3	0.0	0.0	0.0	0.0	5.6	14.8	0.0	3.0	26.8	100
050303	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.5	0.0	17.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	76.7	0.0	2.6	1.1	100
050304	1.9	0.0	0.0	0.6	21.7	14.4	0.0	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	8.1	31.4	0.0	5.0	16.0	100
050305	0.0	0.0	0.0	0.0	52.0	2.7	0.0	7.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	36.8	0.0	0.0	0.6	100
050306	0.0	0.0	0.0	0.0	62.5	0.0	0.0	24.0	5.7	0.0	0.0	0.0	0.8	7.0	0.0	0.0	0.0	100
050401	0.0	0.0	55.1	0.0	35.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.0	1.4	0.0	0.0	100
050402	0.0	0.0	2.5	0.0	30.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	67.0	0.2	0.0	0.0	100
050403	0.0	0.0	0.0	0.0	38.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.6	60.4	0.0	0.0	0.0	100
050501	0.0	0.0	0.0	0.0	93.2	0.0	0.0	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	5.1	0.0	0.0	0.0	100
050502	0.0	0.0	0.0	0.0	99.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	100
050503	0.0	0.0	22.0	0.0	71.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.9	3.7	0.0	0.0	100
050701	0.0	0.0	0.9	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	97.1	0.0	0.0	0.0	100
050702	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0	100
050703	0.0	8.8	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	2.8	0.0	0.0	88.2	0.0	0.0	0.0	100
050704	0.0	0.2	0.0	0.0	16.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.0	0.0	82.5	0.0	0.0	0.0	100
050705	0.0	19.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.0	0.0	0.0	11.9	0.0	0.0	68.1	0.0	0.0	0.0	100
050706	0.0	0.0	0.0	0.0	32.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	67.3	0.0	0.0	0.0	100
050707	0.0	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	95.6	0.0	0.0	0.0	100
050708	0.0	18.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11.9	0.0	0.0	69.6	0.0	0.0	0.0	100
050709	0.0	9.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.2	0.0	0.0	88.8	0.0	0.0	0.0	100
050710	0.0	9.9	0.0	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	5.4	19.8	2.1	0.0	62.0	0.0	0.0	0.0	100
050711	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	15.5	14.0	1.6	0.0	66.5	0.0	0.0	0.0	100
050712	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	92.9	0.0	0.0	6.3	100
050713	0.0	0.0	2.5	0.0	8.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	89.3	0.0	0.0	0.0	100

Clave de Usos del Suelo y Tipos de Vegetación: Bg= Bosque de galería, Ch= Chaparral, MC= Matorral crasicaule, MSe= Matorral sarcocaulo espinoso, MSSi= Matorral sarcocaulo subinermis, Mz= Mezquital, Pa= Palmar, Pc= Pastizal cultivado, Pi= Pastizal inducido, Pq= Bosque de pino-encino, Q= Bosque de encino, Qp= Bosque de encino-pino, R= Agricultura de riego, SBc= Selva baja caducifolia, Sv= Sin vegetación, Ta= Agricultura de temporal cultivos anuales, VG= Vegetación de Galería.

Tabla C.6 Litología y cronoestratigrafía por paisaje terrestre en %.

Unid	K (Gd)	K (Gd- Tn)	K (Gr)	M (Met)	Q (al)	Q (cg)	Q (li)	T (Gr)	Tm (ar- cg)	Tm (VC)	Tpl (ar- cg)	Tpl (ar- cg)	Tpl (lu- ar)	Tpl-Q (ar- cg)	Tpl-Q (bs)	Tpl-Q (cg)	Total
050101	0.0	0.0	0.9	0.0	12.3	6.1	0.1	0.4	1.7	3.6	0.3	5.4	60.9	0.0	0.6	7.7	100
050102	0.0	0.0	0.9	0.0	18.7	58.1	6.6	0.1	0.0	6.9	3.4	0.0	5.1	0.0	0.0	0.2	100
050103	0.0	0.0	26.2	0.0	1.4	1.5	0.0	30.0	1.8	29.2	0.0	0.0	1.0	0.0	8.8	0.1	100
050104	6.3	0.0	46.2	0.0	3.3	21.7	2.2	12.1	0.0	7.4	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.6	100
050105	2.2	0.0	34.9	0.0	8.3	2.2	0.0	0.4	0.0	0.0	17.0	0.0	18.7	15.2	1.2	0.0	100
050106	83.6	0.0	0.0	0.0	5.8	1.4	1.0	0.0	0.0	0.0	8.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	100
050107	0.1	0.0	94.7	0.0	0.0	0.9	0.0	4.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100
050301	0.0	2.6	0.0	0.9	8.4	82.1	0.4	0.0	0.0	0.0	1.8	0.0	3.7	0.0	0.0	0.0	100
050302	0.0	0.7	0.0	0.0	73.8	15.7	0.4	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	9.2	0.0	0.0	0.0	100
050303	0.0	2.7	0.0	2.3	4.9	74.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	15.5	0.0	0.0	0.0	100
050304	1.6	0.1	0.0	0.0	79.8	12.5	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	5.1	0.0	0.0	0.0	100
050305	0.0	0.8	0.0	0.3	8.5	74.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	16.0	0.0	0.0	0.0	100
050306	0.0	0.1	0.0	0.0	5.8	93.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	100
050401	0.0	3.9	0.2	0.0	52.5	40.2	1.4	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100
050402	0.0	46.4	0.0	0.0	1.2	17.5	0.3	34.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100
050403	0.0	11.3	2.9	0.0	3.5	27.0	1.1	54.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100
050501	0.0	1.9	54.6	9.8	4.1	27.6	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	100
050502	0.0	15.3	25.9	36.8	3.7	5.7	0.4	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.3	100
050503	2.2	15.2	0.4	0.0	4.3	18.5	6.2	53.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100
050701	0.0	95.3	0.5	0.0	0.4	3.6	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100
050702	0.0	81.0	15.5	2.8	0.2	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100
050703	0.0	99.3	0.5	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100
050704	0.0	84.6	5.6	0.0	0.6	8.4	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100
050705	0.0	95.6	0.0	4.0	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100
050706	0.0	68.1	28.0	0.1	0.0	0.0	0.0	2.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	100
050707	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100
050708	0.0	97.8	0.0	1.6	0.0	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100
050709	0.0	88.6	2.6	0.0	5.5	3.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100
050710	0.0	95.1	1.8	1.0	0.4	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100
050711	0.0	82.8	0.0	0.0	15.2	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100
050712	0.0	26.3	0.0	0.0	15.2	40.7	0.0	0.0	0.0	0.0	17.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100
050713	0.0	78.2	8.3	0.0	0.1	13.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100

Clave de Unidades Lito-Cronoestratigráficas: K(Gd)= Granodiorita del Cretácico, K(Gd-Tn)= Granodiorita y Tonalita del Cretácico, K(Gr)= Granito del Cretácico, M(Met)= Complejo metamórfico del Mesozoico, Q(al)= Depósitos aluviales del Cuaternario, Q(cg)= Depósitos conglomeráticos del Cuaternario, Q(li)= Depósitos arenosos de litoral del Cuaternario, T(Gr)= Granito del Terciario, Tm(ar-cg)= Depósitos de arenisca y conglomerado del Mioceno, Tm(VC)= Tefra del Mioceno, Tpl(ar)=Arenisca del Plioceno, Tpl(ar-cg)= Depósitos de arenisca y conglomerado del Plioceno, Tpl(lu-ar)= Depósitos de lutita y arenisca del Plioceno, Tpl-Q(ar-cg)= Depósitos de arenisca y conglomerado del Plioceno-Cuaternario, Tpl-Q(bs)= Brecha sedimentaria del Plioceno-Cuaternario, Tpl-Q(cg)= Conglomerado del Plioceno-Cuaternario.

Tabla C.7 Tipos de suelo en % por unidad de paisaje terrestre

Unidades	Hc	Je	Li	Re	Zo	Total
050101	4.5	8.6	0.5	86.3	0.0	100
050102	0.0	6.8	10.2	83.0	0.0	100
050103	0.0	0.0	58.5	41.5	0.0	100
050104	0.0	0.0	15.2	84.8	0.0	100
050105	2.3	2.8	1.0	93.9	0.0	100
050106	0.0	1.1	71.8	27.1	0.0	100
050107	0.0	0.0	18.6	81.4	0.0	100
050301	0.0	4.7	5.1	90.2	0.0	100
050302	0.0	73.3	8.8	17.9	0.0	100
050303	0.0	10.9	12.3	76.8	0.0	100
050304	0.6	72.0	5.4	17.6	4.4	100
050305	0.0	9.3	1.9	88.8	0.0	100
050306	0.0	8.7	91.3	0.0	0.0	100
050401	0.0	51.5	6.2	42.3	0.0	100
050402	0.0	1.7	28.5	69.8	0.0	100
050403	0.0	1.5	6.0	91.5	0.9	100
050501	0.0	0.0	8.9	91.1	0.0	100
050502	0.0	1.3	47.4	51.3	0.0	100
050503	0.0	2.0	4.8	93.2	0.0	100
050701	0.0	0.1	89.3	10.6	0.0	100
050702	0.0	0.2	68.5	31.3	0.0	100
050703	0.0	0.0	96.6	3.4	0.0	100
050704	0.0	0.0	87.8	12.2	0.0	100
050705	0.0	0.0	99.4	0.6	0.0	100
050706	0.0	0.0	62.4	37.6	0.0	100
050707	0.0	0.0	89.1	10.9	0.0	100
050708	0.0	0.8	99.2	0.0	0.0	100
050709	0.0	0.0	95.9	4.1	0.0	100
050710	0.0	0.2	95.7	4.1	0.0	100
050711	0.0	0.3	99.7	0.0	0.0	100
050712	0.0	14.6	38.4	47.0	0.0	100
050713	0.0	0.0	47.8	52.2	0.0	100

CLAVES DE TIPOS DE SUELO: Hc= FEZEM CALCARICO, Je= FLUVISOL EUTRICO, Li= LITOSOL, Re= REGOSOL EUTRICO, Zo= ZOLONCHAK OCRICO.

Tabla C.8 Tipos de clima en % por unidad de paisaje terrestre

Unidades	BS0	BS1	BW	Cw0	Total
050101	1.7	0.0	98.3	0.0	100
050102	0.0	0.0	100.0	0.0	100
050103	0.0	0.0	100.0	0.0	100
050104	0.0	0.0	100.0	0.0	100
050105	0.0	0.0	100.0	0.0	100
050106	0.0	0.0	100.0	0.0	100
050107	0.0	0.0	100.0	0.0	100
050301	40.5	0.0	59.5	0.0	100
050302	23.6	0.0	76.4	0.0	100
050303	91.4	0.2	8.4	0.0	100
050304	34.0	0.0	66.0	0.0	100
050305	66.8	0.1	33.2	0.0	100
050306	30.6	0.0	69.4	0.0	100
050401	53.4	0.0	46.6	0.0	100
050402	21.3	0.0	78.7	0.0	100
050403	55.9	0.0	44.1	0.0	100
050501	32.3	0.0	67.7	0.0	100
050502	4.3	0.0	95.7	0.0	100
050503	26.9	0.0	73.1	0.0	100
050701	96.4	3.6	0.0	0.0	100
050702	29.7	69.2	0.0	1.1	100
050703	42.0	58.0	0.0	0.1	100
050704	83.8	14.1	2.0	0.0	100
050705	21.7	60.8	0.0	17.5	100
050706	85.3	0.0	14.7	0.0	100
050707	9.0	67.7	0.0	23.3	100
050708	2.4	74.9	0.0	22.7	100
050709	34.5	63.6	0.0	1.9	100
050710	26.4	58.0	0.1	15.5	100
050711	22.5	48.1	0.0	29.3	100
050712	19.0	0.0	81.0	0.0	100
050713	92.7	7.3	0.0	0.0	100

CLAVES DE TIPOS DE CLIMA: BS0= SECO Y CALIDO (EL MAS SECO DE LOS BS), TEMPERATURA MEDIA ANUAL >22°C, LA DEL MES MAS FRIJO <18°C, REGIMEN DE LLUVIAS DE VERANO. BS1= SECO Y CALIDO (EL MENOS SECO DE LOS BS), TEMPERATURA MEDIA ANUAL >22°C, LA DEL MES MAS FRIJO <18°C, REGIMEN DE LLUVIAS DE VERANO. BW= DESERTICO, CALIDO, TEMPERATURA MEDIA ANUAL >22°C, LA DEL MES MAS FRIJO <18°C, REGIMEN DE LLUVIAS DE VERANO. CW0= TEMPLADO SUBHUMEDO, TEMPERATURA MEDIA ANUAL ENTRE 12° Y 18°C Y LA DEL MES MAS FRIJO ENTRE -3° Y 18°C, EL MAS SECO DE LOS TEMPLADOS SUBHUMEDOS, CON LLUVIAS DE VERANO.

Tabla C.9 Intervalos de isotermas (temperatura media anual) por paisaje terrestre en %.

Unidades	<18*	18-20	20-22	22-24	>24	Total
050101	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	100
050102	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	100
050103	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	100
050104	0.0	0.0	0.0	36.6	63.4	100
050105	0.0	0.0	0.0	67.4	32.6	100
050106	0.0	0.0	0.0	10.7	89.3	100
050107	0.0	0.0	0.0	34.1	65.9	100
050301	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	100
050302	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	100
050303	0.0	0.0	2.0	98.0	0.0	100
050304	0.0	0.0	0.0	84.7	15.2	100
050305	0.0	0.0	0.1	99.9	0.0	100
050306	0.0	0.0	0.0	91.7	8.3	100
050401	0.0	0.0	0.0	57.8	42.2	100
050402	0.0	0.0	0.0	46.5	53.5	100
050403	0.0	0.0	0.0	63.6	36.4	100
050501	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	100
050502	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	100
050503	0.0	0.0	0.0	56.4	43.6	100
050701	0.0	0.0	1.4	98.6	0.0	100
050702	4.0	28.6	34.3	33.1	0.0	100
050703	1.0	26.4	31.9	40.7	0.0	100
050704	0.0	0.4	15.0	84.5	0.0	100
050705	16.4	33.3	28.3	22.0	0.0	100
050706	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	100
050707	6.6	48.6	37.2	7.6	0.0	100
050708	24.3	59.5	16.2	0.0	0.0	100
050709	2.2	46.6	13.1	38.0	0.0	100
050710	14.6	30.6	20.6	34.2	0.0	100
050711	28.6	23.1	26.4	21.8	0.0	100
050712	0.0	0.0	39.5	60.5	0.0	100
050713	0.0	0.0	3.4	96.6	0.0	100

*VALOR DE LÍMITES DE INTERVALO DE ISOTERMA EN GRADOS CENTIGRADOS.

Tabla C.10 Intervalos de lluvia total anual (en mm) por unidad de paisaje terrestre en %.

Unid	125-250*	250-275	275-350	350-450	450-600	600-750	Tot
050101	20.6	49.2	30.2	0.0	0.0	0.0	100
050102	73.2	26.8	0.0	0.0	0.0	0.0	100
050103	12.9	87.1	0.0	0.0	0.0	0.0	100
050104	36.9	63.1	0.0	0.0	0.0	0.0	100
050105	0.0	99.4	0.6	0.0	0.0	0.0	100
050106	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100
050107	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100
050301	38.2	0.0	53.6	8.2	0.0	0.0	100
050302	37.3	0.0	61.9	0.8	0.0	0.0	100
050303	0.0	0.0	93.1	6.9	0.0	0.0	100
050304	0.0	31.2	68.5	0.3	0.0	0.0	100
050305	0.0	0.1	99.3	0.5	0.0	0.0	100
050306	0.0	49.3	50.5	0.2	0.0	0.0	100
050401	0.0	34.1	63.6	2.3	0.0	0.0	100
050402	0.0	57.5	38.5	4.0	0.0	0.0	100
050403	0.0	37.5	27.2	35.3	0.0	0.0	100
050501	12.3	52.7	34.0	1.1	0.0	0.0	100
050502	9.0	89.8	1.2	0.0	0.0	0.0	100
050503	0.0	89.3	10.7	0.0	0.0	0.0	100
050701	0.0	0.0	5.1	94.9	0.0	0.0	100
050702	0.0	0.0	0.5	94.6	4.8	0.0	100
050703	0.0	0.3	3.8	69.7	26.2	0.0	100
050704	0.0	3.4	39.6	51.1	5.9	0.0	100
050705	0.0	0.0	1.6	37.8	60.5	0.0	100
050706	0.0	9.9	54.6	35.5	0.0	0.0	100
050707	0.0	0.0	0.2	60.1	39.7	0.0	100
050708	0.0	0.0	0.0	19.2	80.8	0.0	100
050709	0.0	0.0	0.2	46.4	50.0	3.4	100
050710	0.0	0.6	1.8	32.7	45.6	19.2	100
050711	0.0	0.0	0.0	43.1	31.4	25.6	100
050712	35.2	0.0	31.3	33.6	0.0	0.0	100
050713	0.0	7.6	38.8	53.6	0.0	0.0	100

*VALOR DE LÍMITES DE INTERVALO DE LLUVIA TOTAL ANUAL EN MM.

Tabla C.11 Variables biofísicas y socioeconómicas empleadas en el análisis estadístico realizado para definir la aptitud de uso del suelo para cada unidad ambiental (Fuente: SEDUE-OEA, 1992:20).

-
-
- 1.- Agua potable
 - 2.- Calidad del agua
 - 3.- Clasificación Salina de Wilcox
 - 4.- Clima
 - 5.- Cobertura vegetal
 - 6.- Concentración de coliformes en el agua
 - 7.- Comunicación aérea
 - 8.- Comunicación marítima
 - 9.- Corrientes marinas
 - 10.- Crecimiento poblacional
 - 11.- Decretos y propuestas de áreas naturales protegidas
 - 12.- Diversidad biológica
 - 13.- Drenaje
 - 14.- Edafología
 - 15.- Educación
 - 16.- Electricidad
 - 17.- Elevación topográfica
 - 18.- Especies cinegéticas
 - 19.- Especies endémicas, amenazadas, o en peligro de extinción
 - 20.- Especies de importancia comercial
 - 21.- Geomorfología
 - 22.- Infraestructura agropecuaria
 - 23.- Infraestructura hotelera
 - 24.- Infraestructura industrial y comercial
 - 25.- Inversión
 - 26.- Manejo del agua
 - 27.- Número de pozos
 - 28.- Número de viviendas
 - 29.- Número de habitantes
 - 30.- Oxígeno disuelto en agua
 - 31.- Organización para la producción
 - 32.- Pendiente marina
 - 33.- Pendiente topográfica
 - 34.- Población ocupada (Sector Primario)
 - 35.- Población ocupada (Sector Secundario)
 - 36.- Población ocupada (Sector Terciario)
 - 37.- Precipitación pluvial
 - 38.- Recreación y cultura
 - 39.- Rendimientos agrícolas (granos básicos)
 - 40.- Rendimientos agrícolas (forrajes)
 - 41.- Rendimientos agrícolas (frutales)
 - 42.- Rendimientos agrícolas (hortalizas)
 - 43.- Salinidad
 - 44.- Salud
 - 45.- Suelo propiedad federal
 - 46.- Suelo propiedad privada
 - 47.- Suelo tenencia ejidal
 - 48.- Substrato
 - 49.- Telecomunicaciones
 - 50.- Temperatura del mar
 - 51.- Temperatura atmosférica
 - 52.- Tipo de acuífero
 - 53.- Tipo de vivienda
 - 54.- Tipos de vegetación
 - 55.- Transparencia del agua
 - 56.- Transporte
 - 57.- Vías comunicación terrestres
-
-



BIBLIOTECA
DR. JORGE A. VIVO

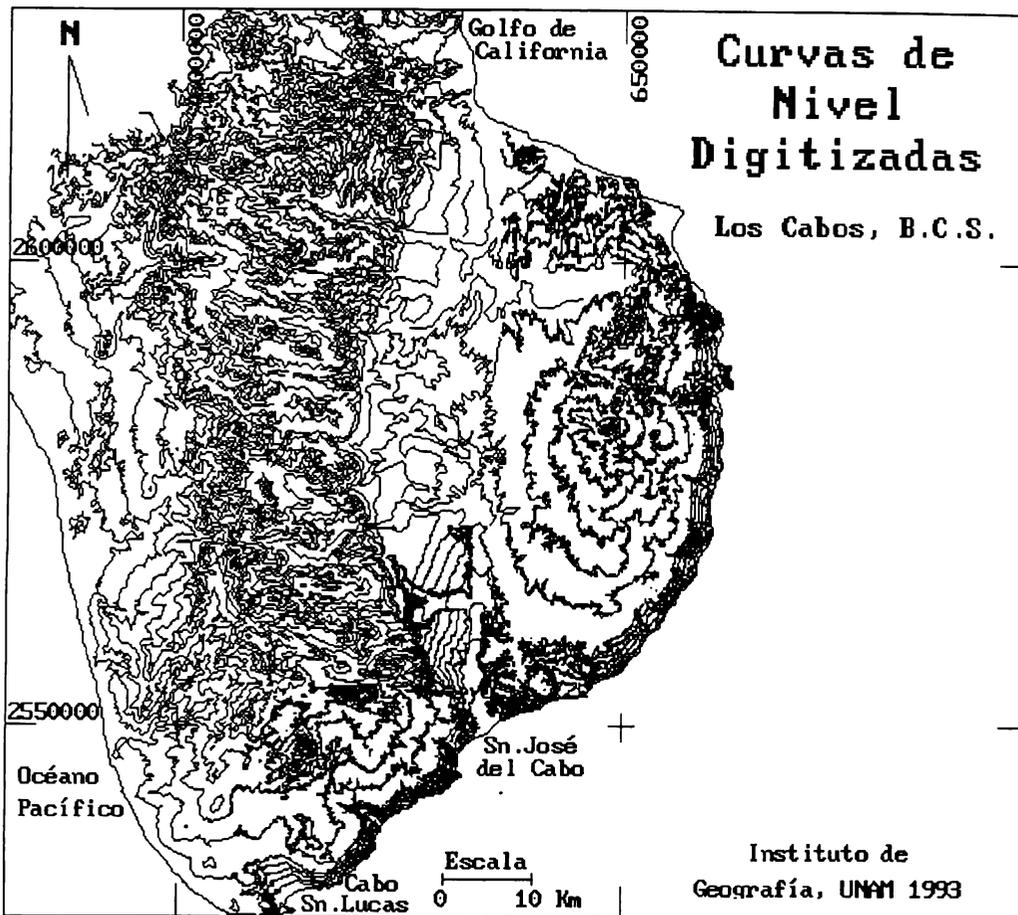


Figura C.1 Curvas de nivel digitizadas para la generación del modelo digital del terreno (MDT).

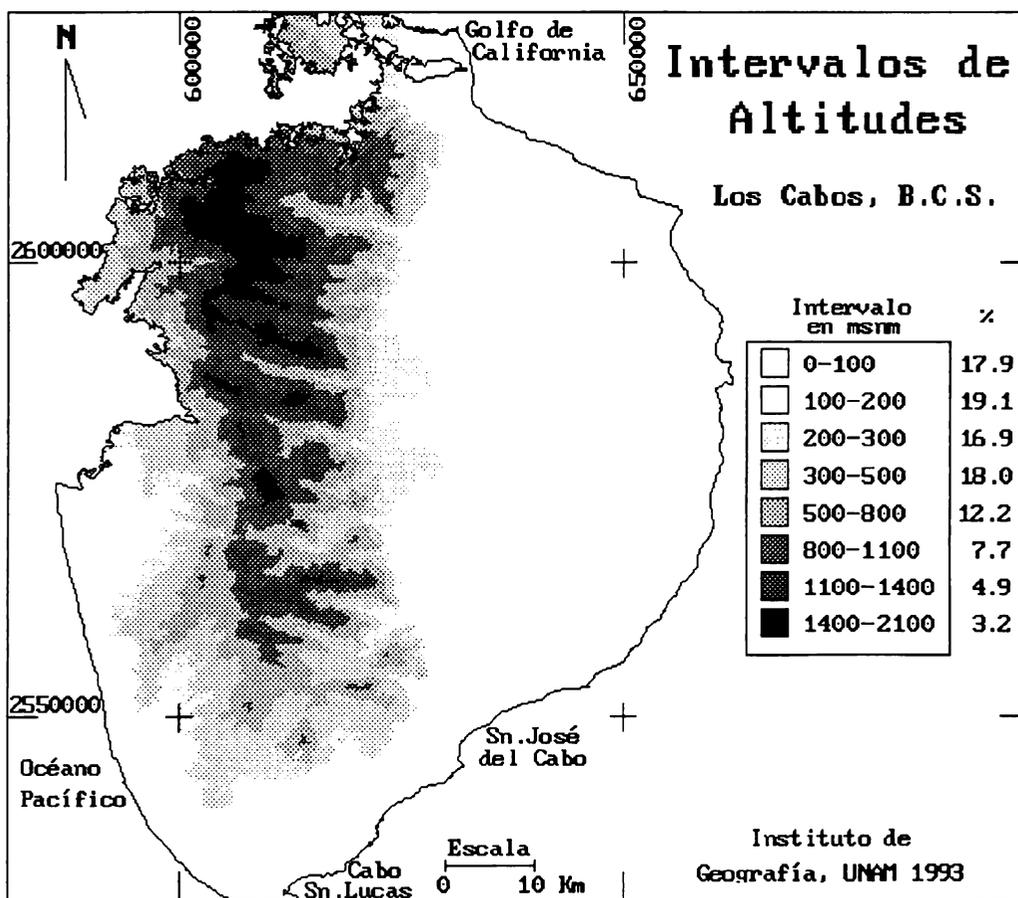


Figura C.2 Mapa de intervalos de altitudes

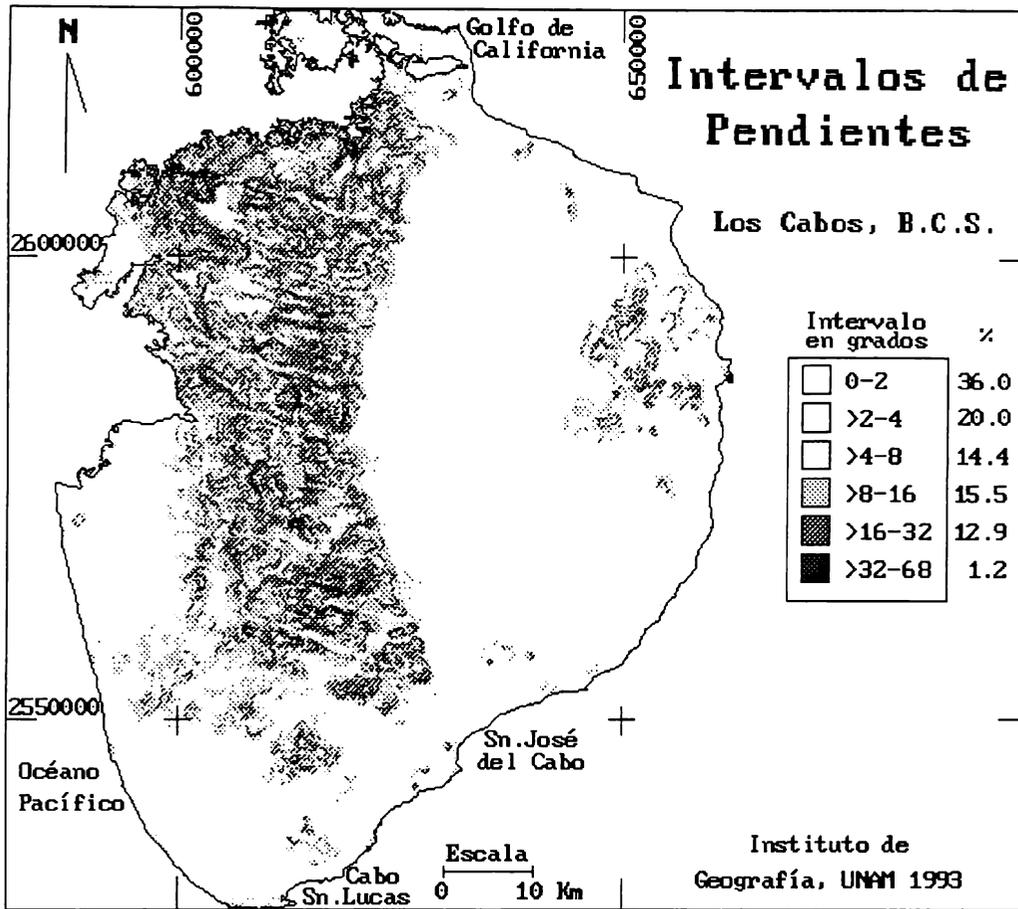


Figura C.3 Mapa de intervalos de pendientes

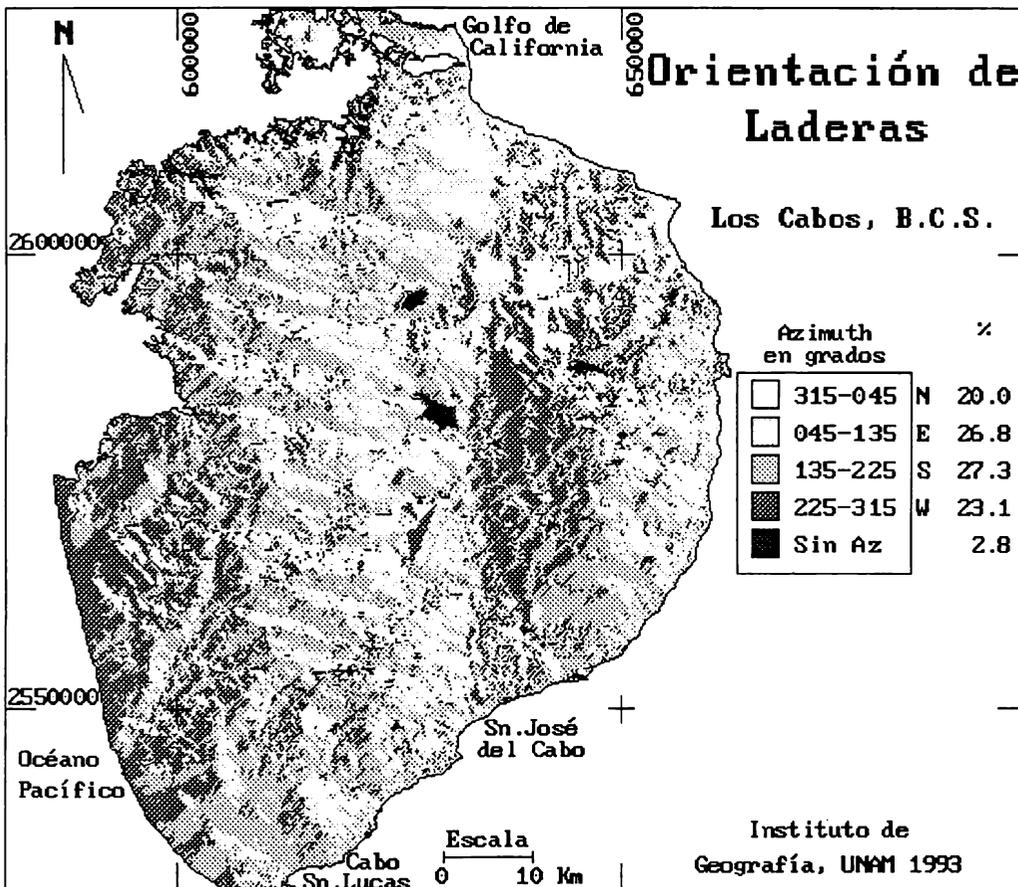


FIGURA C.4 MAPA DE INTERVALOS DE ORIENTACION DE LADERAS

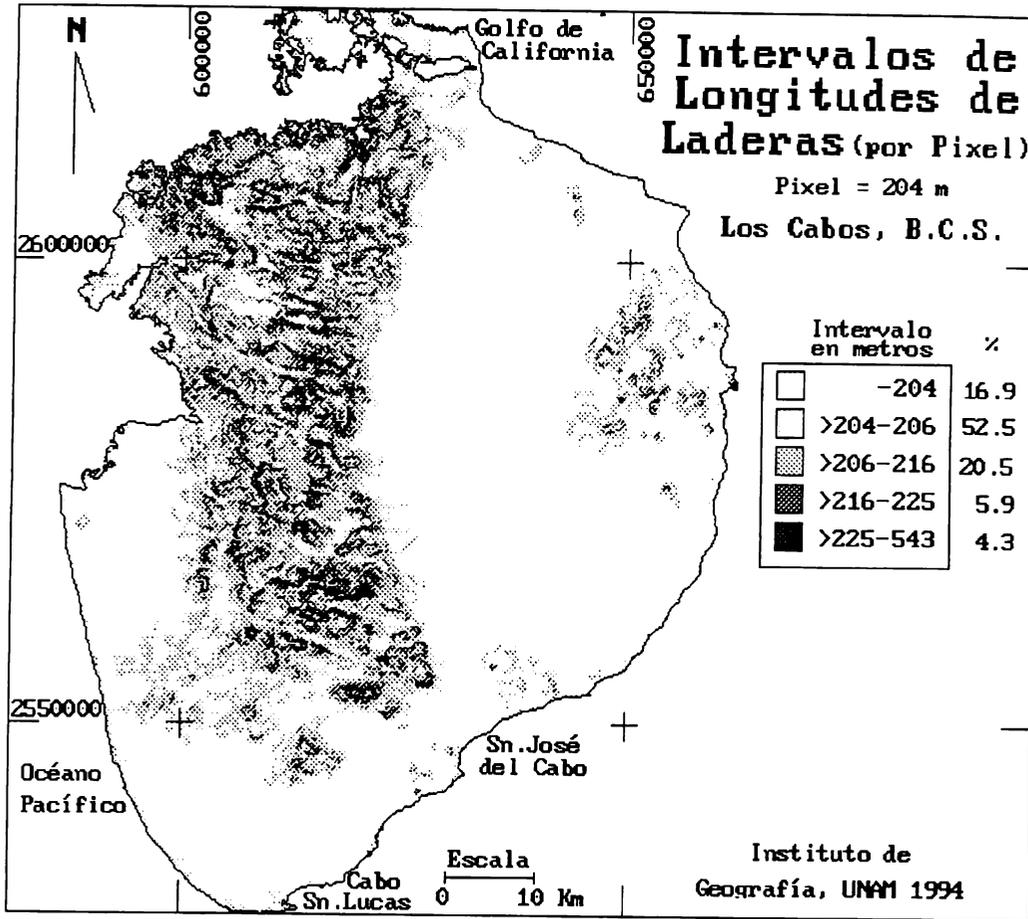


Figura C.5 Mapa de intervalos de longitudes de laderas

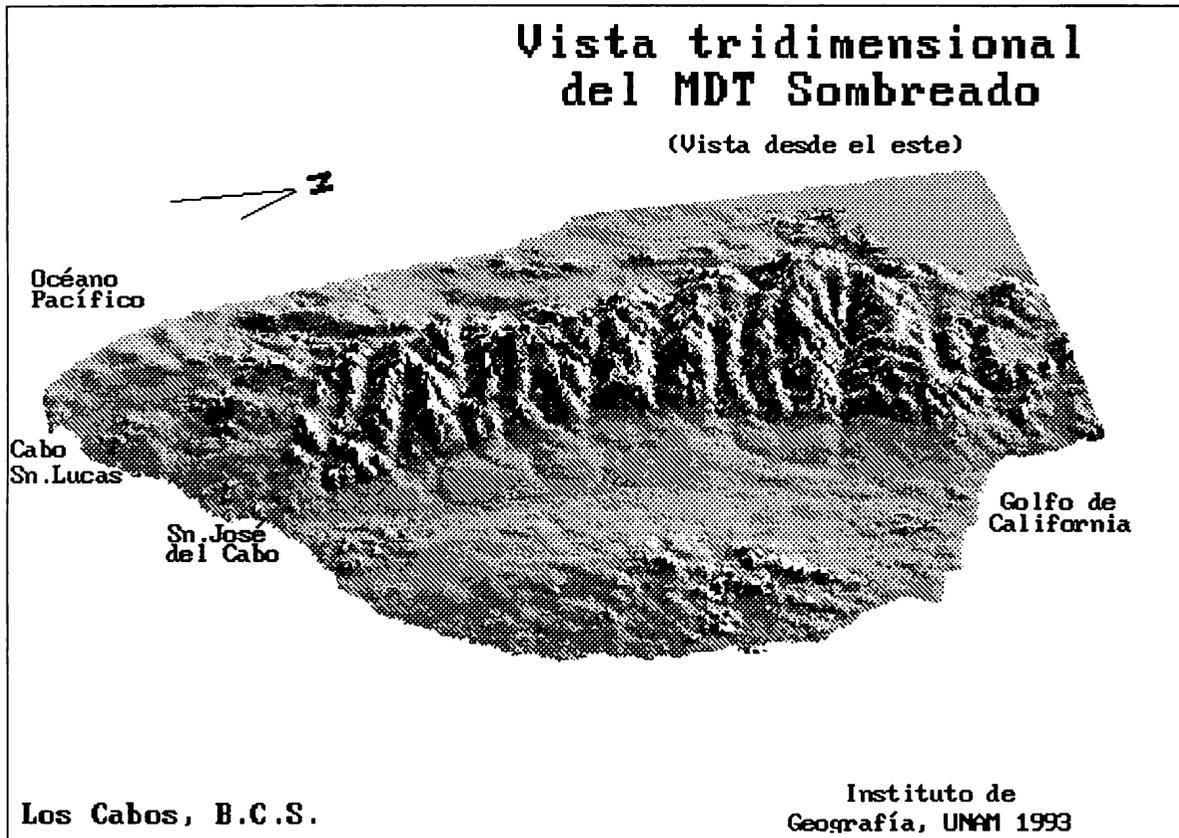


Figura C.6 Vista tridimensional del MDT sombreado (vista desde el este)

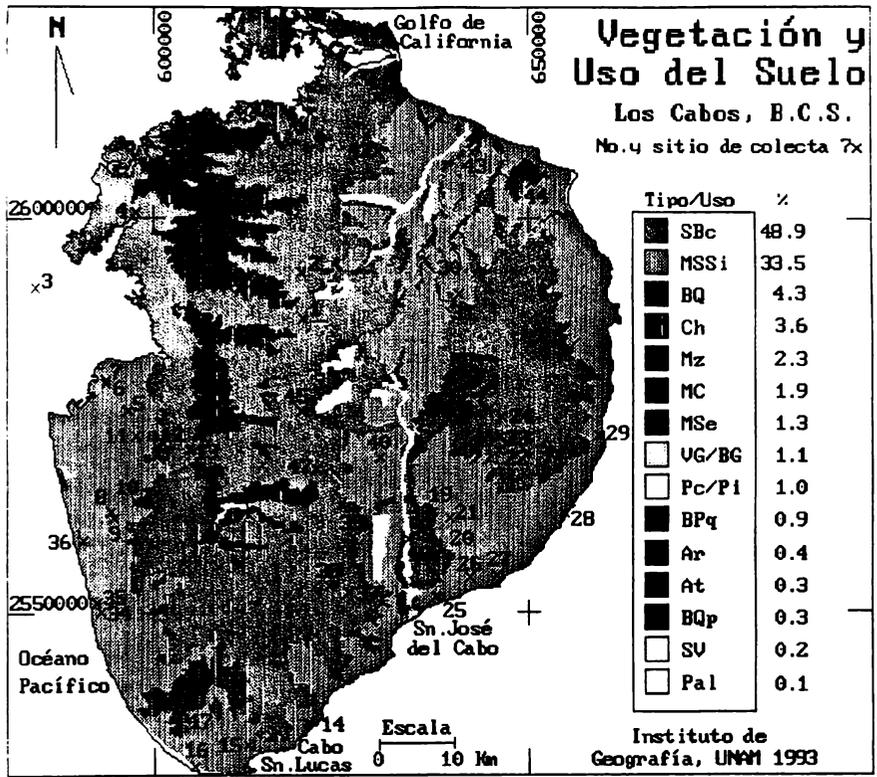


Figura C.7 Mapa de Vegetación y uso del suelo

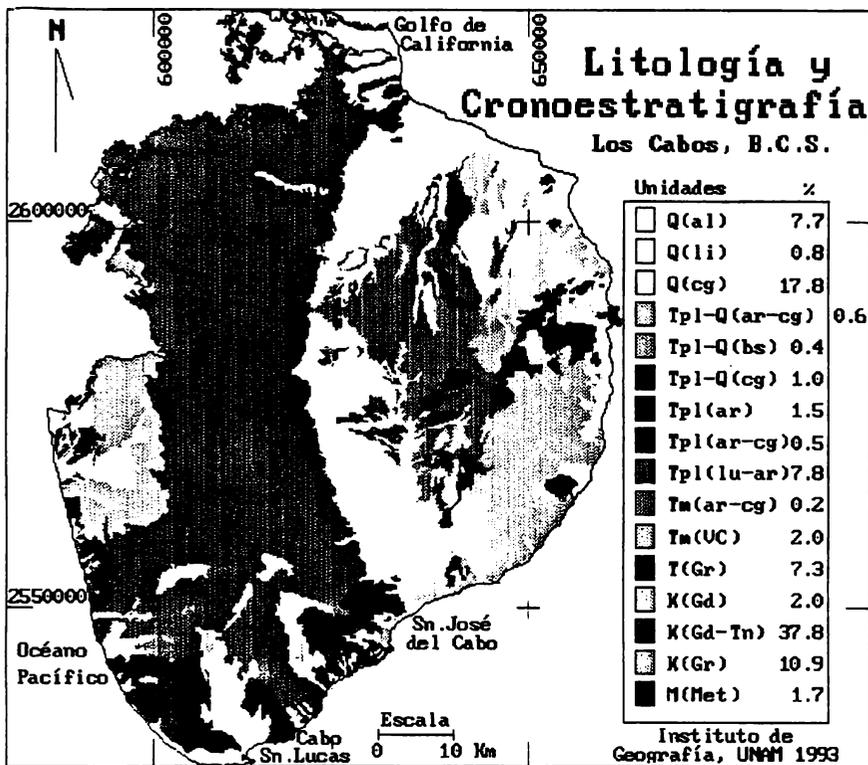


Figura C.8 Mapa Geológico

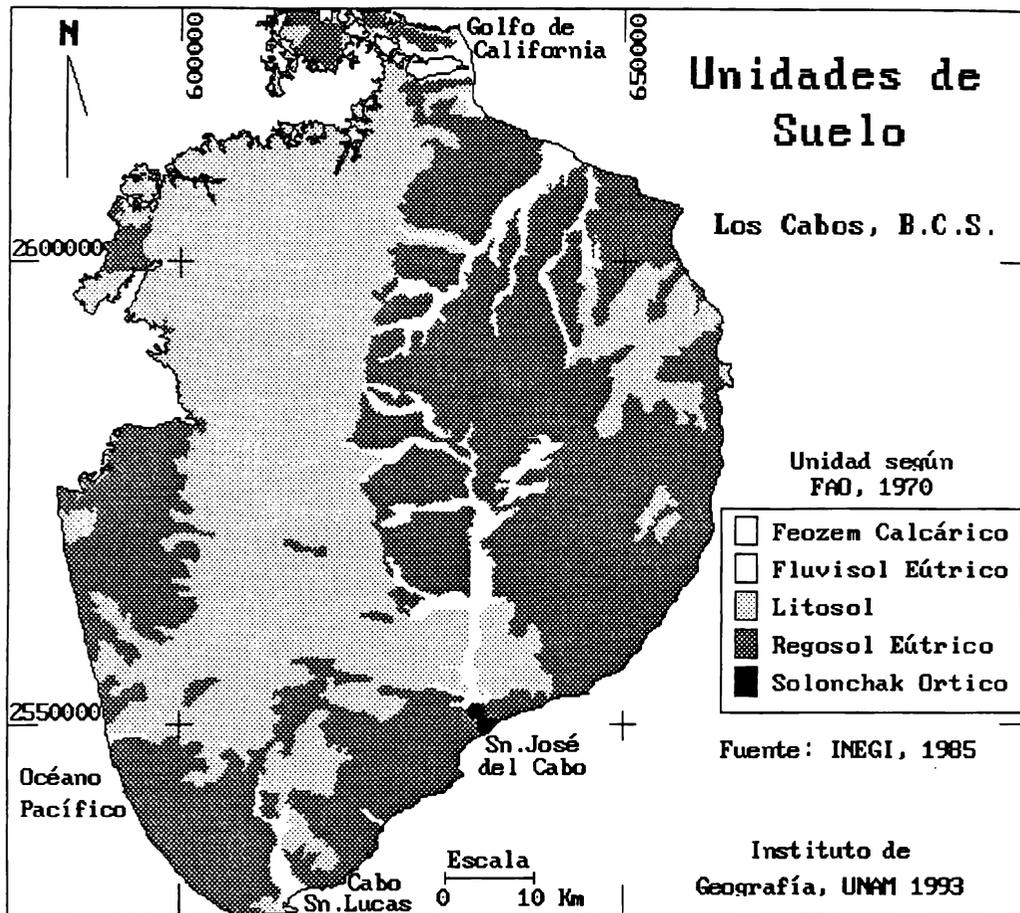


Figura C.9 Mapa de unidades de suelo

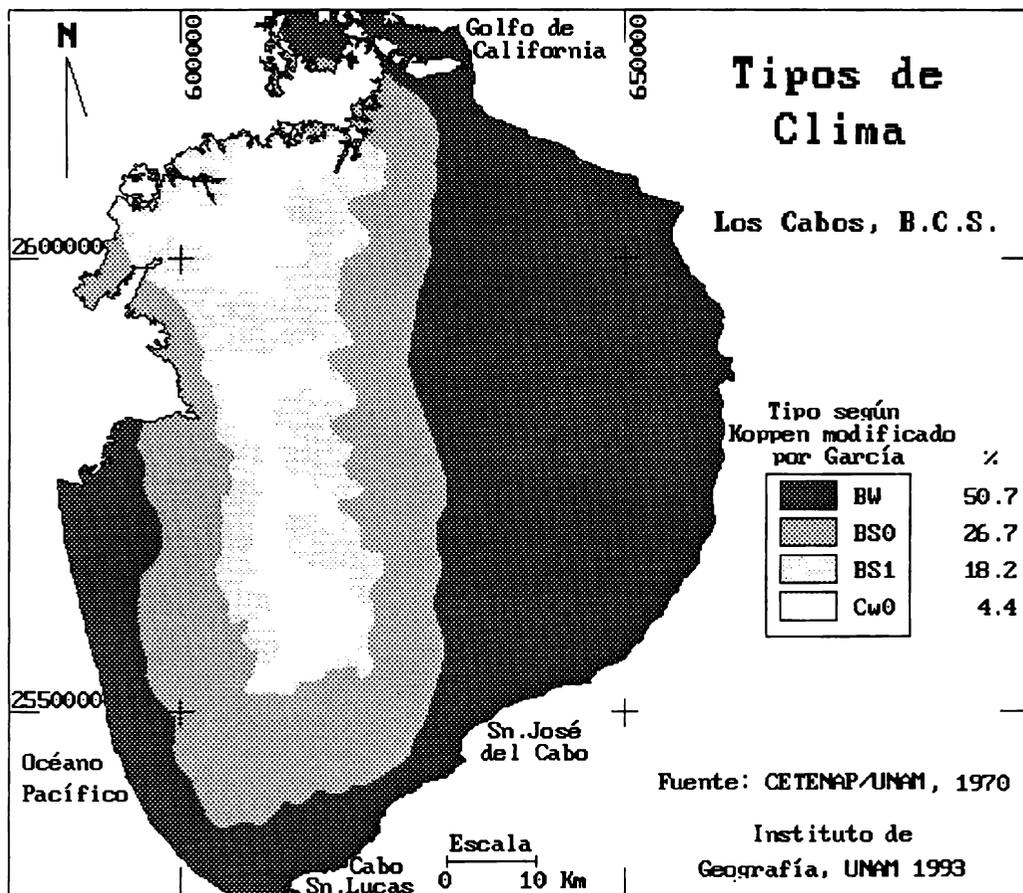


FIGURA C.10 MAPA DE TIPOS DE CLIMA

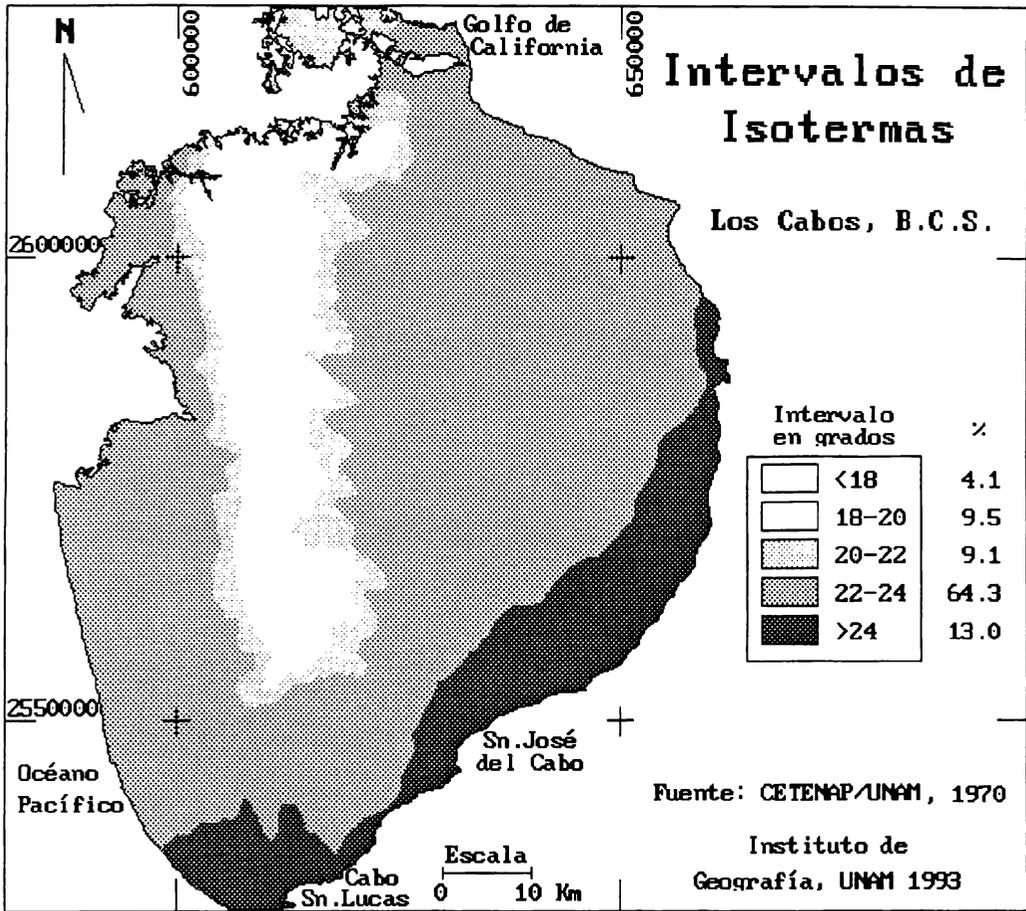


Figura C.11 Mapa de isothermas

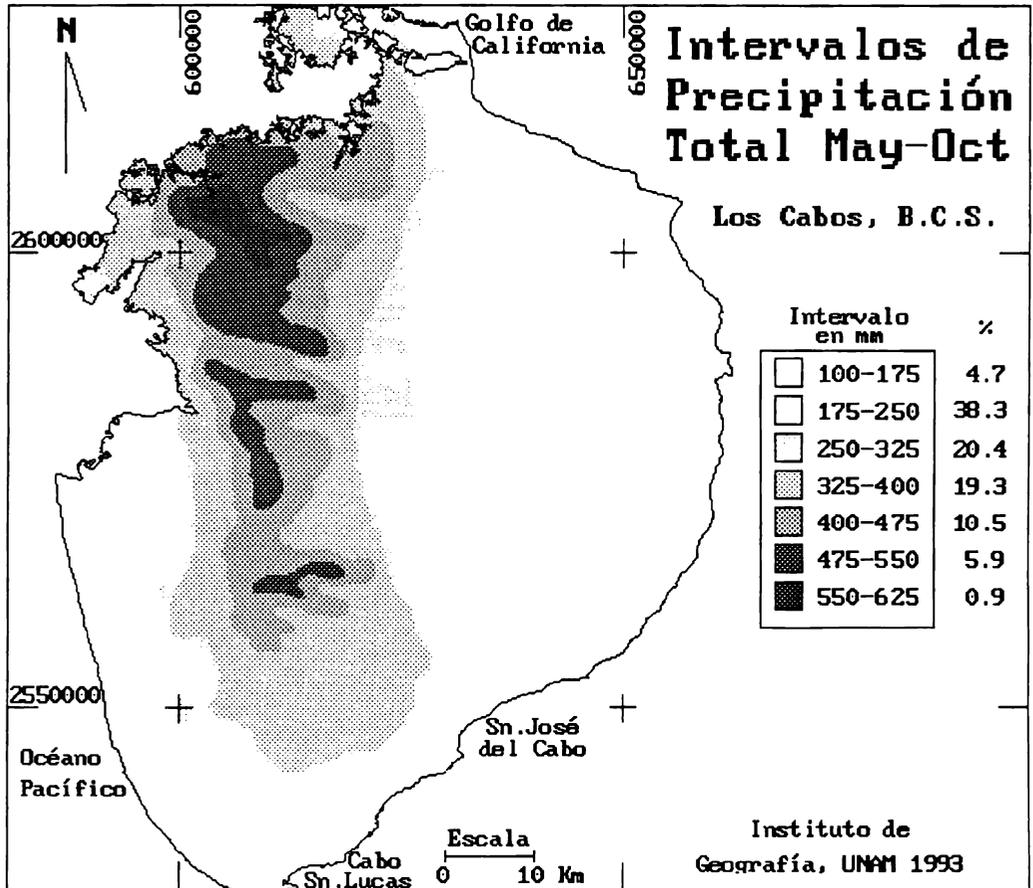


FIGURA C.12 MAPA DE INTERVALOS DE PRECIPITACION TOTAL (MAYO-OCTUBRE)

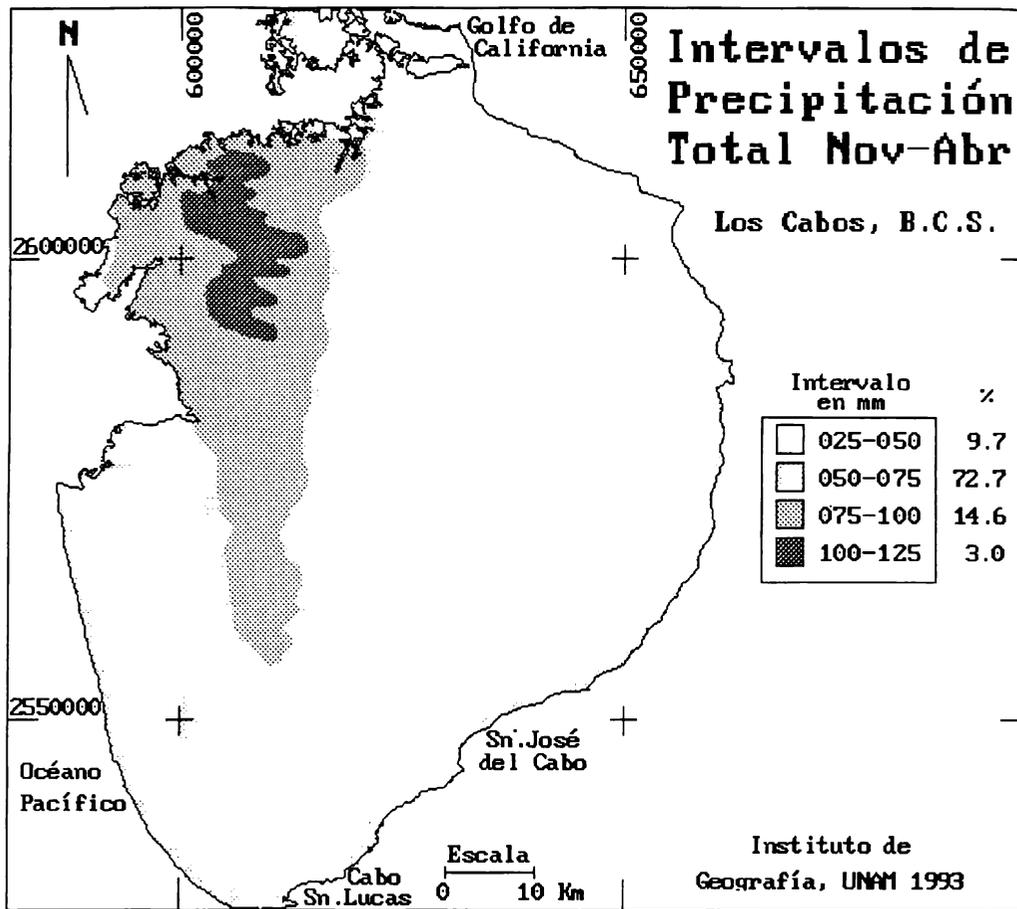


Figura C.13 Mapa de precipitación total (noviembre-abril)

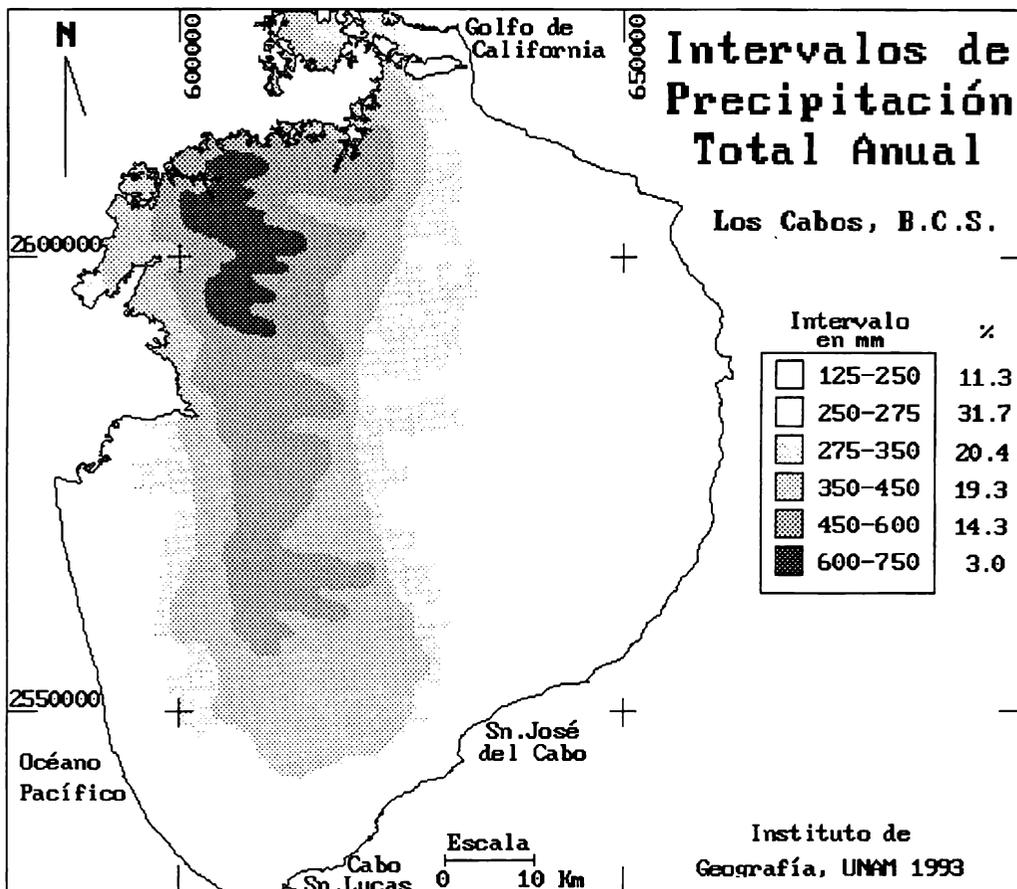


FIGURA C.14 MAPA DE INTERVALOS DE PRECIPITACION TOTAL ANUAL

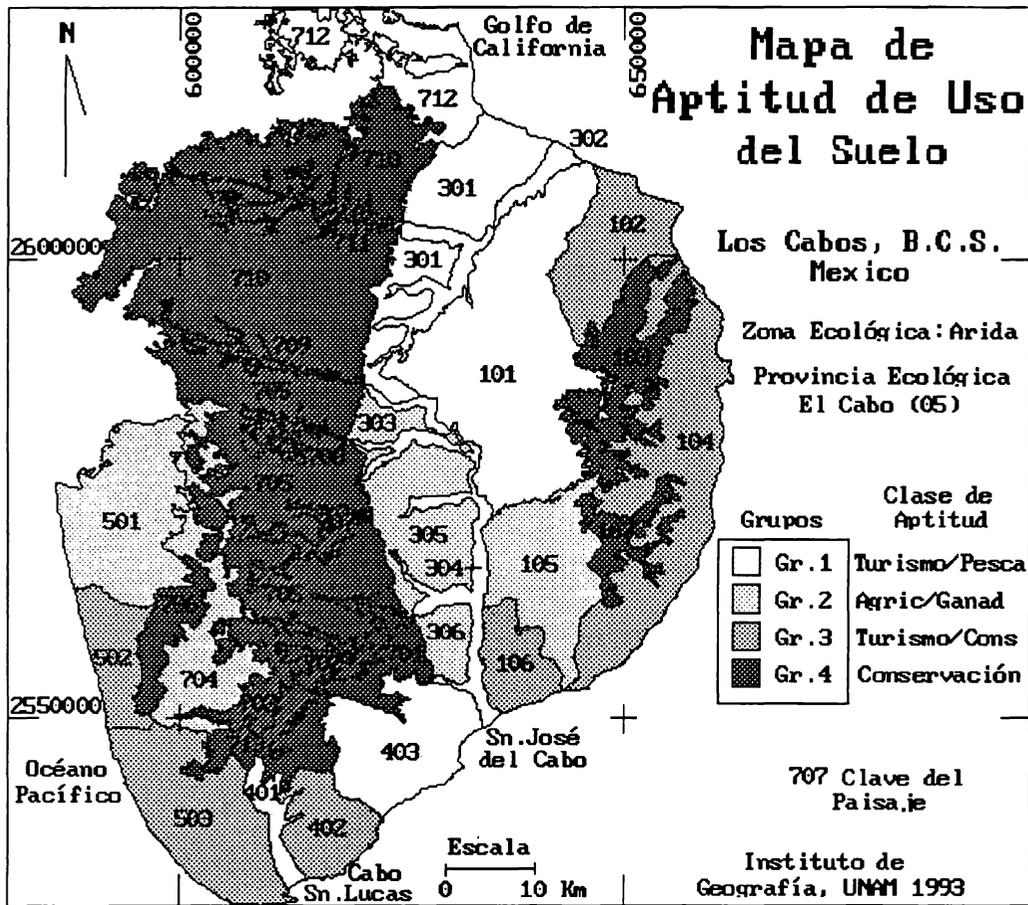


Figura C.15 Mapa de aptitud de uso del suelo

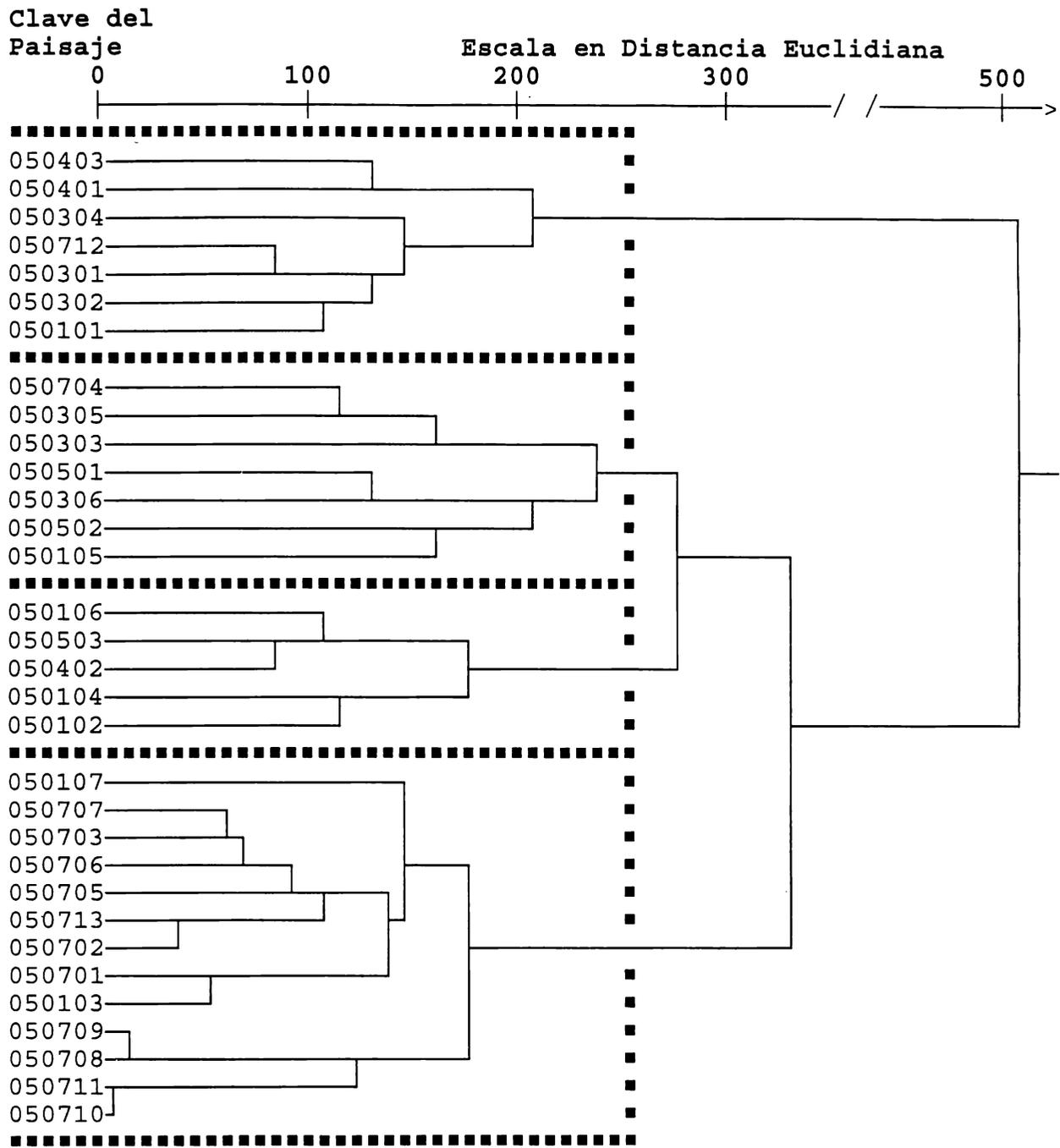


Figura C.16 Dendrograma del análisis de clasificación numérica. Las líneas horizontales continuas representan la similitud entre los grupos. Las líneas horizontales intermitentes sirven para unir los cuatro principales grupos de paisajes terrestres. Las unidades de la escala horizontal están en distancias multivariadas (distancia euclidiana), ésta representa el nivel de similitud o diferencia entre los grupos formados. La línea vertical intermitente representa el umbral de agrupamiento a 254 unidades multivariadas (Tomado de SEDUE-OEA, 1992:27).